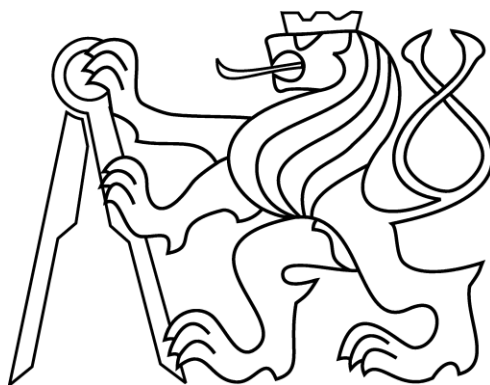


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra hydrotechniky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Zjištění měrných křivek jezových klapek pomocí CFD včetně
hydrodynamického zatížení**

**Determination of the rating curves of weir flap gates using CFD
including hydrodynamic load**

Vedoucí diplomové práce: Dr. Ing. Petr Nowak

Leden, 2017

Bc. Langová Lucie



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Tháškova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Langová Jméno: Lucie Osobní číslo: 395680

Zadávací katedra: 142 - Katedra hydrotechniky

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Zjištění měrných křivek jezových klapek pomocí CFD včetně hydrodynamického zatížení.

Název diplomové práce anglicky: Determination of the rating curves of weir flap gates using CFD including hydrodynamic load.

Pokyny pro vypracování:

Provedení rešerše zahraniční i domácí literatury a zpracování známých podkladů naměřených na fyzikálních modelech do ucelené formy. Návrh zjednodušeného tvaru klapky pro matematický model a provedení výpočtů CFD v prostředí CFX za účelem získání měrných křivek a celkového hydrodynamického zatížení na konstrukci. Porovnání získaných výsledků CFD modelu s hodnotami uváděnými ve známé literatuře. Shrnutí výsledků a návrh doporučeného postupu pro přepočet na tvarově shodné konstrukce.

Seznam doporučené literatury:

Medřický, V. Valenta, P. - Hydrotechnické stavby 1 - Navrhování jezů

Novak, P. Guinot, V. Jeffrey, A. Reeve, D. - Hydraulic Modelling - an Introduction

Gabriel, P. Grandtner, T. Průcha, M. Výbora, P. - Jezy

Jméno vedoucího diplomové práce: Dr. Ing. Petr Nowak

Datum zadání diplomové práce: 21.9.2016

Termín odevzdání diplomové práce: 8.1.2017

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

21.9.2016

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem ČVUT 1/2009 „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

V Praze dne

.....

Lucie Langová

Poděkování

Ráda bych tímto poděkovala vedoucímu diplomové práce Dr. Ing. Petru Nowakovi a Ing. Evě Škařupové za jejich vstřícný přístup a odbornou pomoc při zpracování této práce. Poděkování také patří Katedře hydrotechniky, která mi umožnila přístup k softwarovému vybavení, se kterým jsem pracovala.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá teoretickým popisem konstrukce duté klapky používané v České republice a v zahraničí. Dále popisuje metodiku hydrotechnických výpočtů pro určení průtoku a některých zatížení na duté klapce. A také uvádí podrobnosti o dvou měřeních na fyzikálních modelech provedených ve vodohospodářské laboratoři Fsv ČVUT v Praze.

Praktická část práce se věnuje popisu návrhu zjednodušeného CFD matematického modelu přepadu přes dutou klapku v prostředí CFX za účelem získání měrných křivek a hydrodynamického zatížení konstrukce klapky bez vlivu dolní vody a bez vzniku podtlaků pod přepadovým paprskem.

V závěru práce jsou uvedeny matematickým modelem získané veličiny v grafickém i číselném provedení. Součástí je i porovnání získaných výsledků z modelu jak s empiricky určenými hodnotami, tak s hodnotami získanými na fyzikálních modelech provedených v minulosti ve vodohospodářské laboratoři FSv ČVUT v Praze.

Klíčová slova: Dutá klapka, 2D matematické modely, CFD, CFX;

Abstract

This thesis describes the theoretical construction of the fishbelly gate used in the Czech Republic and abroad as well as the methodology of hydraulic calculations for determining water flow and some of the loads on the fishbelly gate. It also gives details of two measurements of the physical models made in the Water Management Experimental Centre FCE CTU in Prague.

The practical part is devoted to a description of the simplified CFD mathematical model (in CFX environment) of the overflow over the fishbelly gate in order to obtain rating curves and hydrodynamic load on the construction of the fishbelly gate without the influence of lower water and without vacuum under the overflow beam.

Conclusion of the thesis is given a mathematical model derived variables in both numerical and graphical execution. Conclusion also includes a comparison of the results obtained from the model with empirically determined values and the values obtained on physical models made in the past in the Water Management Experimental Centre FCE CTU in Prague.

Keywords: Fishbelly gate, 2D mathematical models, CFD, CFX;

OBSAH

1	ÚVOD.....	2
2	POKLOPOVÉ JEZY	3
3	DUTÁ KLAPKA	5
3.1	Konstrukce duté klapky	5
3.1.1	Skelet duté klapky	5
3.1.2	Příčné a podélné vyztužení.....	8
3.1.3	Pohybovací mechanismy	8
3.1.4	Spodní stavba, čepová ložiska a těsnění.....	10
3.2	Hydrotechnické výpočty	12
3.3	Statické působení	20
3.4	Data pro analýzu získaná fyzikálním modelováním v minulosti	21
3.4.1	Fyzikální model dle Doc. Průchy	22
3.4.2	Fyzikální model dle prof. Čábelky	22
3.5	Duté klapky v zahraničí	24
4	MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ	27
4.1	Teorie matematického modelování	27
4.2	Tvorba matematického modelu.....	31
4.2.1	Geometrie.....	31
4.2.2	Výpočetní síť.....	33
4.2.3	Nastavení a okrajové podmínky	34
4.2.4	Parametrizace	38
4.2.5	Získaná data	41
4.2.6	Prezentace výsledků	45
5	ANALÝZA VÝSLEDKŮ.....	58
5.1	Porovnání s empirickými výpočty	58
5.2	Srovnání s Čábelkovým pokusem.....	60
5.3	Srovnání s Průchovým pokusem.....	63
5.4	Srovnání s hydrodynamickými momenty dle Wickerta	65
6	ZÁVĚR	67
7	SEZNAM ZDROJŮ A POUŽITÉ LITERATURY	
8	SEZNAM OBRÁZKŮ	
9	SEZNAM TABULEK	
10	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	
11	SEZNAM PŘÍLOH.....	

1 ÚVOD

Již od dávné historie lidstva patří k nejrozšířenějším vodním stavbám jezové stavby. První zmínky o nich se datují již do dob před 6000 lety. Přesto však jejich rozvoj zaznamenal mimořádný pokrok až v minulém století. Jezy můžeme dělit dle jejich konstrukčního řešení na jezy pevné a pohyblivé. Pohyblivé jezy vzdouvají vodu pohyblivými hradíci uzávěry z oceli. Uzávěry se zvedají, spouštějí, vypouštějí či sklápějí, čímž se mění plocha průtočného profilu pro převedení vody jezem. Při pohybu uzávěru dochází ke změnám zatížení od vodního tlaku. Tyto změny zatížení byly v minulosti zjišťovány pouze pomocí fyzikálních modelů ve vodních laboratořích.

Tato práce se zabývá možností využití matematické simulace k určením průtokových charakteristik a změnami hydrodynamického zatížení na duté klapce, která je u nás nejčastěji používaným pohyblivým uzávěrem ze skupiny poklopových uzávěrů. Cílem této diplomové práce je popsat vytvořený 2D CFD matematický model přepadu vody přes zjednodušené těleso duté klapky při zavzdušnění prostoru pod přepadovým paprskem. Dalším cílem této práce je prezentace a analýza zjištěných hodnot specifických průtoků a hydrodynamického zatížení na hradícím plechu klapky při různém sklopení konstrukce a při různých úrovních hladin horní vody.

Práce je rozčleněna do tří hlavních částí. V první velké části jsou obsaženy: popis konstrukce duté klapky používané v České republice a v zahraničí, postup hydrotechnických výpočtů pro určení průtoku a zatížení na duté klapce a popis fyzikálních modelů v minulosti provedených ve vodohospodářské laboratoři FSv ČVUT v Praze. V druhé velké části je popsána teorie vytváření matematických modelů a samotný postup při tvoření modelu duté klapky. Součástí druhé části je i popis a grafické zobrazení výsledků průtokových charakteristik a hydrodynamického zatížení, zjištěných matematickým modelem. Ve třetí části jsou hodnoty získané z matematického modelu porovnány s výsledky získanými empirickými vzorci a s hodnotami z popsaných fyzikálních modelů.

[3,6]

2 POKLOPOVÉ JEZY

Pokloповé jezy jsou díky nejjednodušší konstrukci nejpoužívanějším typem pohyblivých jezů u nás. V každém jezovém poli jsou tvořeny jedním nebo několika poklopy s ovládacím zařízením. Poklopy jsou hradící tělesa deskovitého tvaru nebo v příčném řezu mírně zakřivené z důvodu zlepšení hydraulických podmínek. Pro zlepšení statických podmínek lze použít i prostorové vyztužení konstrukce. Při manipulaci je hradící stěna sklápěna kolem vodorovné osy. Podle umístění osy dělíme pokloповé jezy do tří skupin:

- poklopy s osou otáčení na spodní stavbě
- poklopy s osou otáčení nad spodní stavbou
- poklopy s osou otáčení nad hladinou vzduté vody.

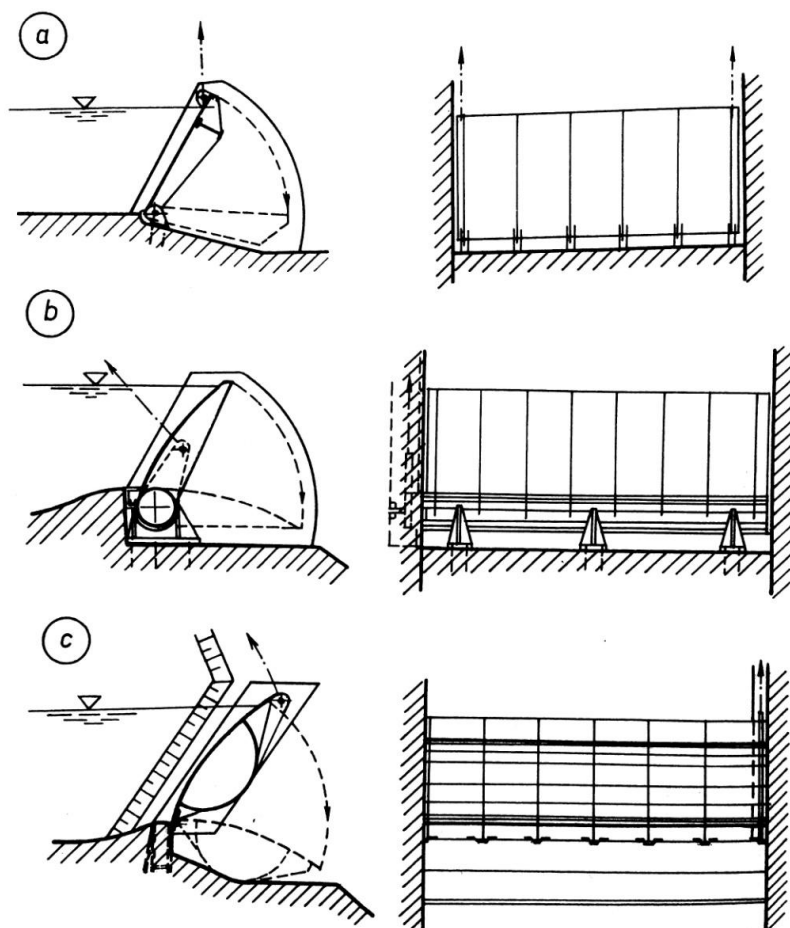
Pokloповé jezy s osou otáčení na spodní stavbě označujeme jako klapky. Dnes patří k často navrhovaným konstrukcím. Jejich výhodou je, že většina zatížení od vlastní tíhy a tlaku vody se přenáší po celé délce rovnoměrně přes ložiska do spodní stavby jezu a z ní dále do podloží. Ložiska klapek jsou trvale umístěné pod hladinou vody. To způsobuje problémy například s jejich korozi, s obroušováním vířícími splaveninami nebo složitou údržbou. Zbytek působících sil se přenáší pomocí pohybovacích prvků, na kterých jsou klapky zavěšeny nebo jimi podepřeny. Pokud je klapka zavěšená, část zatížení se přenáší na pilíře.

Klapky fixují vzdutou hladinu na stálé úrovni přepadem vody přes sklopené těleso. Přepad zajišťuje jemnou regulaci hladiny horní vody a zároveň umožňuje převádět přes jez plovoucí předměty (ledové kry, větve, listí, atd.) bez značných ztrát vody. Vzniklý přepadový paprsek zatěžuje oblast vývaru méně, než jiné jezové uzávěry. Klapky se svojí konstrukcí nejsou vhodné pro převádění splavenin sunutých po dně. Lze je převádět pouze při sklopení klapky do nejnižší polohy, přičemž část splavenin se usazuje pod klapkou a zhoršuje její ovladatelnost. Tento problém lze vyřešit pomocí uzavíratelných proplachovacích kanálů vyústěných pod klapku na vypláchnutí usazených splavenin a plynulým napojením spodní stavby jezu na dno zdrže. I s těmito úpravami se klapky hodí spíše na toky bez chodu splavenin.

Další nevýhodou klapkových konstrukcí je, že často trpí na kmitání. Kmitání se předchází tak, že se hradící stěna navrhuje hydraulicky zaoblená a na horní hranu klapky se

připevňují rozrážeče, aby se zamezilo nechtěnému zatížení od proudící vody. Prostor pod klapkou musí být vždy dokonale zavzdušněn, aby nevznikaly podtlaky.

Klapky, jak je známe dnes, byly vyvinuty jako náhrada za jednoduché sklápěné dřevěné desky. Současné klapky lze dle jejich tvaru příčného řezu dělit na deskové, troubové a duté, jak je zobrazeno na obrázku 2.1 – *Základní typy klapek a) desková, b) troubová, c) dutá*.



Obr. 2.1 – Základní typy klapek a) desková, b) troubová, c) dutá [6]

Dnešní klapky se skládají z ocelové nosné konstrukce a z hradící stěny tvořené zaobleným ocelovým plechem. V dnešní době ustoupilo použití troubových a deskových klapek používání dutých klapek, které lze použít i pro větší konstrukce. V dalším textu této se budu zabývat pouze dutými klapkami.

[2,3,6,10]

3 DUTÁ KLAPKA

3.1 Konstrukce duté klapky

U vzniku duté klapky došlo k pozvednutí trouby u troubové klapky ze dna spodní stavby do horní části klapky. Po úpravách trouba splynula s hradicí stěnou v jedno duté těleso. Tato konstrukce má stejné materiálové nároky jako desková nebo troubová klapka, ale má větší průřezovou plochu. Průřezová plocha ovlivňuje únosnost a tuhost na kroucení. Duté klapky jsou schopny přenášet větší ohybové i momentové zatížení než deskové a troubové klapky.

Zajímavým předchůdcem dnešní konstrukce duté klapky byla konstrukce podle návrhu V. Helcla, která se u nás rozšířila v polovině minulého století. Klapka byla tvořena ze dvou zakřivených ocelových plechů ve tvaru čocky s příčným i podélným vyztužením. Spodní část hradicího plechu byla zaoblена do válcové plochy okolo čepových ložisek. Zaoblení umožnilo dobré dosedání prahového těsnění na hradicí plech i v nejnižší poloze klapky. Na konci konstrukce, kde byl uchycen ovládací prvek, byla mezi poslední dvě diafragmy vložena trouba. Trouba byla prodloužená až do pilíře, kde bylo umístěno koncové čepové ložisko, na které byla připevněna pohybovací páka. Tento typ klapky byl výhodný při použití ovládání pomocí cévových tyčí, protože celý mechanismus byl umístěn uvnitř pilíře, kde nedochází k proudění vody. Další výhodou této konstrukce bylo, že se zatížení od krouticího momentu přenášelo do pilíře koncovým ložiskem.

[3,4,6]

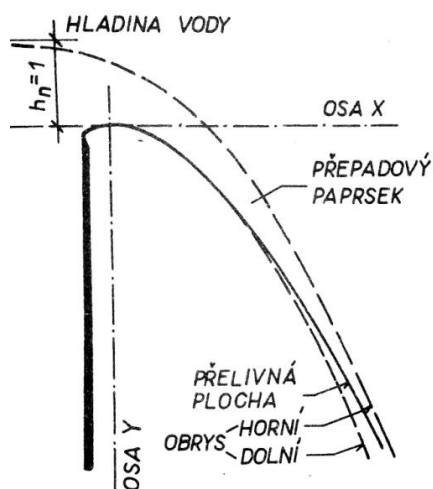
3.1.1 Skelet duté klapky

V dnešní době se duté klapky konstruují podle optimálního geometrického tvaru z hydraulického i statického hlediska, který byl stanoven při hydrotechnickém modelovém výzkumu provedeném v minulosti. Doporučený příčný řez dutou klapkou je zobrazen na *Obr. 3.1 – Doporučený příčný řez dutou klapkou*. Rozměry klapky byly ověřeny na realizovaných konstrukcích. Čočkovité tělo duté klapky se skládá ze zakřiveného hradicího ocelového plechu a z výztužného plechu na vzdušní straně, který má větší zakřivení než hradicí. Tvar hradicího plechu by se měl přibližovat tvaru proudnicovému, protože dojde k plynulému průběhu tlaku bez vzniku podtlaku, a tedy menšímu hydrodynamickému zatížení konstrukce. Ovšem z výrobních důvodů se hradicí plech pouze válcově zaobljuje s poloměrem R :

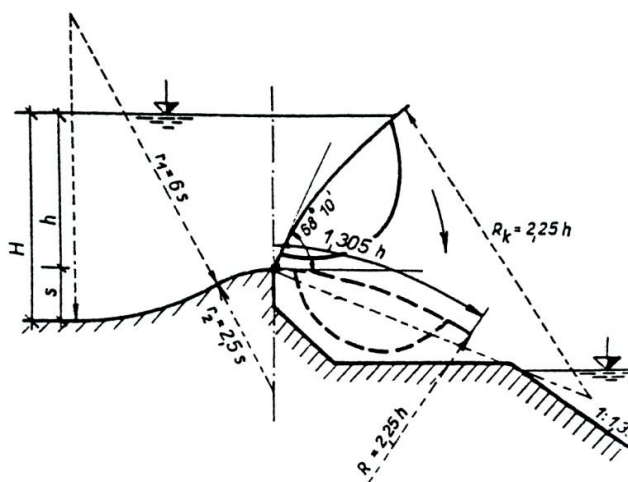
závisí na statických požadavcích. Tloušťka obou plechů se navrhuje tak, aby došlo k přenesení krouticího momentu.

Dříve byla vztyčená poloha klapky navrhována pod úhlem $\omega = 62^\circ$ až 68° v současnosti se navrhuje úhel větší, přibližně $\omega = 75^\circ$ až 85° , protože sklon klapky ovlivňuje velikost působícího zatížení. Sklon je definován úhlem mezi vodorovnou přímkou a tečnou k zaoblené hradící stěně v místě jejího připojení na spodní stavbu. V této práci je tento úhel vztyčení klapky označován jako úhel ω . Ve vztyčené poloze by neměl přepadový paprsek dopadat na výřez pro sklopenou klapku, ale na navazující přelivnou plochu.

Při maximálním sklopení klapky by měla při návrhovém průtoku vzniknout spolu s tvarem spodní stavby beztlaková proudnicová přelivná plocha. Při průtoku menšího množství vody se změní na tlakovou plochu s nižší kapacitou. Při průtocích větších pak přechází do plochy podtlakové a zvětšuje se kapacita klapky. Proudnicová plocha je ideálním tvarem přelivu. Její tvar je odvozen z dolního obrysu přepadového paprsku o výšce 1 m, přepadajícího přes ostrohranný přeliv, který je dokonale zavzdušněn a bez bočních kontrakcí. Tvary proudnicových ploch byly experimentálně stanoveny pány Creagerem, Smetanou, Oficerovem či Scimemim, protože proudnicový tvar je závislý na mnoha faktorech. Přepadový paprsek o návrhové výšce je po přelivné ploše veden plynule, nedochází k odtrhávání paprsku a zároveň přelivná plocha není namáhána tlaky ani podtlaky. Je-li výška přepadového paprsku větší než návrhová výška paprsku, vznikají na přelivné ploše podtlaky, protože paprsek se snaží od plochy odrhnout. Pokud je výška přepadového paprsku menší než výška návrhová, je přepadový paprsek proudnicovou plochou podepírán a působí na ni tlaky. Jedná se o podtlakové a tlakové přelivné plochy.



Obr. 3.2 – Obrysy přepadového paprsku [6]



Obr. 3.3 – Práh jezu s klapkovým uzávěrem [6]

Při přepadu vody přes klapku vzniká za jezem bystřinné proudění. Na proudnicovou přelivnou plochu navazuje vodorovné dno vývaru, které slouží k tlumení kinetické energie vody. Ve vývaru dochází k záměrnému přechodu bystřinného proudění na říční proudění vodním skokem.

[3,4,6,7,10,20]

3.1.2 Příčné a podélné vyztužení

Pro lepší přenos zatížení po konstrukci se duté klapky příčně i podélně vyztužují. Příčné vyztužení je prováděno diafragmami, které jsou z ocelového plechu tlustšího, než je hradicí plech. Diafragmy jsou připojeny k oběma válcovým stěnám ve vzájemných vzdálenostech, určených výpočtem. Diafragmy jsou připojeny ke spodní stavbě pomocí čepových ložisek. Počet ložisek je určen nutným počtem příčných výztuh. V diafragmách jsou umístěny průlezné otvory, které slouží k revizím a opravám vnitřního prostoru klapky. Duté klapky jsou díky své tuhosti ovládané pouze na jednom konci. Diafragma na poháněném konci přenáší největší krouticí moment od vodního tlaku a vlastní tíhy. Koncová diafragma tedy musí být buď zesílená, nebo je v místě uchycení ovládacího prvku zdvojená.

Podélníky slouží k vyztužení hradicí stěny, kde přebírají tlak vody. Dříve se realizovaly z válcovaných [profilů a připevňovaly se pomocí nýtů. Dnes se navrhují jako svařované z válcovaných úhelníků nebo T průřezů. Rozmístění podélníků ve svislém směru se dříve navrhovalo podle zatížení hydrostatickým tlakem. Dnes jsou podélníky rozmístěny symetricky ve stejných vzdálenostech okolo osy hradicího plechu, stejně jako výztužný plech. Vzdálenost mezi podélníky závisí na ohybovém namáhání.

[3,6,7,10]

3.1.3 Pohybovací mechanismy

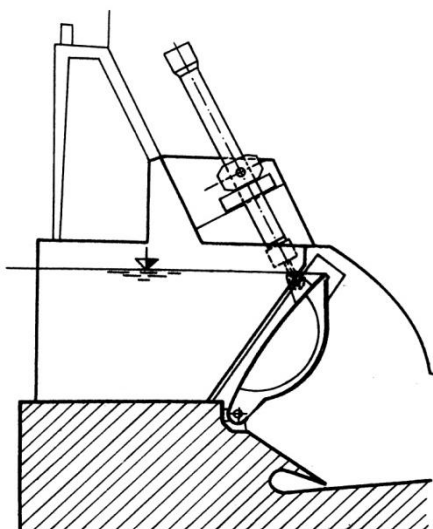
Skládání dutých klapek lze zajistit pohybovacím mechanismem pouze na jedné straně konstrukce, protože je klapka tuhá na kroucení. Pro zajištění provozních bezpečnostních podmínek se ovšem na konstrukci umísťují ovládací mechanismy na oba konce. V minulosti byla nejvíce používána pro pohyb klapek cévová tyč. Nevýhodou jejího uchycení bylo umístění v průtočné ploše, kde docházelo k nárazům většími plovoucími předměty. V současnosti jsou místo cévové tyče klapky ovládané pomocí hydromotorů. Výsledný moment hydromotorem vyvozené síly na rameni k ose otáčení musí být vždy větší, než maximální krouticí moment vznikající při proudění přes sklopenou klapku. Hodnoty výsledných momentů určují umístění hydromotoru. Nevýhodou použití

hydromotorů je stálé zatížení vodím tlakem a vlastní tíhou i v plně zdvižené poloze. Tento problém lze vyřešit pomocí aretačních vzpěr.

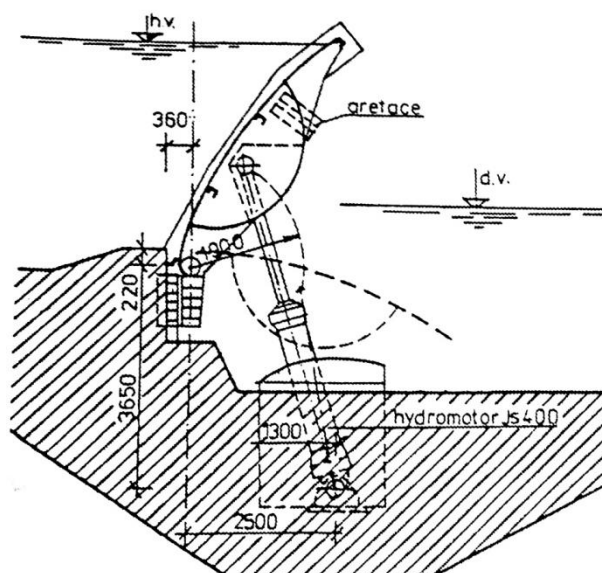
Ovládání klapky může být provedeno zavěšením na hydromotoru, kdy horní konec válce je připevněn na čepové ložisko upevněné k armované konzoli vystupující z pilíře. Dolní konec pístní tyče je kloubově uchycen na krajní zesílenou diafragmu, která je namáhána tahem, tlakem, reakcemi v ložisku a smykem působícím podél připojení průřezu klapky. Stejně jako cévová tyč je hydromotor umístěn v průtočném profilu a je vystaven možnosti nárazu plovoucích předmětů. Před poškozením jej lze chránit vytvořením výklenku v pilíři za klapkou a překrytím železobetonovou svislou stěnou. Výhodou zavěšení na hydromotor je jednodušší možnost kontroly. Při zavěšení konstrukce musí být podlaha strojovny na pilířích v úrovni půl metru nad hladinou stoleté vody.

Druhým, častěji navrhovaným, způsobem manipulace s klapkou je podepření konstrukce na vzdušní straně pomocí dvou či více hydromotorů. Pístní tyč hydromotoru je horním koncem kloubově připevněna ke klapce. Připojení může být provedeno buď v místě horního styku hradícího a výztužného plechu, kdy zdvihová síla působí na větším rameni a je nutné použít delší hydraulický válec. Nebo je připojení umístěno uprostřed vyboulení výztužného plechu, kdy zdvihová síla působí na kratším rameni a válec musí mít větší průměr. Druhým koncem je hydromotor uchycen pomocí mohutného čepového ložiska, které je ukotveno ke spodní stavbě jezu. Hydromotory přenášejí do základů síly od tlaku vody a vlastní tíhy konstrukce klapky. Spodní stavba se okolo uložení hydromotoru armuje, aby došlo k roznesení zatížení do okolí. Ve spodní stavbě je umístěna komunikační chodba, ve které vedou rozvody potrubí, přivádějící tlakový olej k válcům. Kompresor, včetně nádrže na olej, je umístěn v šachtě v pilíři. Pilíře mohou být díky tomu velmi nízké. Toto řešení uchycení hydromotorů je náchylné na zanášení splaveninami a ucpávání. Výhodou podepření je menší náchylnost na kmitání konstrukce. Při sklápění klapky se zatížení krouticím momentem mění. Při podepření klapky jsou tyto změny výhodněji přenášeny.

[3,6,7,10, 20]



Obr. 3.4 – Zavěšená dutá klapka[6]



Obr. 3.5 – Podepřená dutá klapka[11]

3.1.4 Spodní stavba, čepová ložiska a těsnění

Spojení konstrukce klapky se spodní stavbou jezu je realizováno čepovými ložisky s výsuvnými čepy, které umožňují jednodušší montáž a údržbu. Ložiska jsou vypouzdřena bronzem, aby nedocházelo k otlačení. Jsou uložena na svařovaných stoličkách, které jsou ukotveny do spodní stavby. Stoličky jsou nejčastěji umístěny na vzdušné straně klapky, ve výřezu nízkého zaobleného prahu, takže jsou dobře přístupné. Ve výřezu pro klapku se často víří splaveniny a může docházet k obroušení ložisek nebo zanášení jemnými částicemi. Výřez by měl být navržen tak, aby se v něm nezadržovala voda. Prostor mezi jednotlivými ložisky a spodní stavbou je překryt zaobleným koncem hradícího plechu, na který dosedá prahové těsnění. Ložiska jsou ve výřezu zaobleného prahu umístěna tak, aby při sklopení klapky měl hradící plech a prahem ve vrcholu společnou tečnu.

Nejpoužívanějším z nízkých zaoblených prahů je Jamborův práh. Jeho rozměry byly určeny při modelovém výzkumu. Jamborův práh vyvolává malé vzduť horní vody, ale navyšuje celkovou výšku hradící konstrukce. Výška prahu je navrhována ze závislosti na hloubce vody před přelivem, dle vztahu:

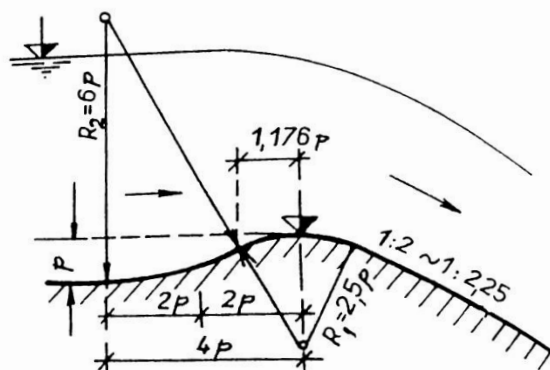
$$H_p = (0,15 - 0,2) \cdot H \quad (3.2)$$

Kde: H_p Výška Jamborova prahu [m]

H Hloubka vody před přelivem [m]

Součinitele přepadu přes Jamborův práh nabývá hodnot v rozmezí $m = 0,42 - 0,53$. Jamborův práh je plynule napojen na dno zdrže. Tvar Jamborova prahu v příčném řezu je

tvoreň dvěma navazujícími válcovými plochami a šikmou rovinou, na kterou je připojen vývar, jak lze vidět na *Obr. 3.6 – Jamborův nízký práh*. Šikmá rovina, navazující na výřez pro klapku, má v případě použití sklopné typizované konstrukce sklon 1:1,35.



Obr. 3.6 – Jamborův nízký práh [10]

Prahové těsnění vodorovné spáry mezi hradicím plechem a spodní stavbou jezu je provedeno profilovanou pryží. Jeden konec pryže je připevněn ocelovým pásem ke spodní stavbě jezu a druhý konec volně leží na hradicím plechu. Volný konec je přirozeně dotlačován tlakem vody na plech. Toto připevnění umožňuje sklápění klapky bez namáhání těsnění. Boční těsnění se navrhuje také z tvarované pryže. Na bocích dosedá těsnění na vyhřívané štíty, aby nedošlo ke znemožnění ovládání v zimních měsících.

Velká únosnost a prostorová tuhost konstrukce klapek umožňuje realizovat klapky s hrazenou výškou až 6 m a délkou jezového pole až 40 m. Dutá klapka je často používaná jako vrata plavebních komor horního ohlavi s nepřímým plněním nebo také jako uzávěr bezpečnostního přelivu přehrad. Duté klapky lze používat také na kombinovaných pohyblivých jezích, kdy se využívá jejich výhod při jemné regulaci hladiny horní vody. Výška klapky se v tomto případě navrhuje v rozmezí (30-35) % celkové hradicí výšky kombinovaného uzávěru. K častému použití dutých klapek na jezích u nás nejvíce přispěla možnost jednoduché realizace. Celou konstrukci klapky, včetně ovládacích prvků, vyztužení a ložisek, lze dopravit na staveniště v jednom kusu. Výhodou této prefabrikace je možnost přezkoušení ve výrobní hale, jednoduché osazení a ukotvení na předpřipravenou spodní stavbu jezu. Technologii tzv. Balených jezů lze využít jen u menších konstrukcí s hrazenou výškou 1,5 – 2,1 m a rozpětím 6 -12 m.

[2,3,6,7,10,12,20]

3.2 Hydrotechnické výpočty

Pomocí hydrotechnických výpočtů lze stanovit základní parametry a rozměry jezu. Výchozí hodnotou při návrhu díla je návrhový průtok, který musí být vždy bezpečně převeden jezem. Návrhový průtok se u pohyblivého jezu převádí při vyhrazení všech polí. Při proudění vody přes jez může dojít ke dvěma variantám přepadu. Dokonalý přepad vzniká, pokud hladina dolní vody nemá vliv na kapacitu jezu. Hladina dolní vody je obvykle pod úrovní koruny přelivu. Základní rovnici pro průtok při dokonalém přepadu přes jez lze odvodit z rovnice pro výtok obdélníkovým otvorem, kde hladina vody nedosahuje k hornímu obrysu otvoru. Po úpravě získáme rovnici:

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot b_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h_0^{\frac{3}{2}} \quad (3.3)$$

Kde:	Q	Průtok	[m ³ /s]
	μ	Součinitel přepadu	[-]
	b ₀	Účinná šířka pole přelivu	[m]
	g	Tíhové zrychlení	[m/s ²]
	h ₀	Energetická výška přepadového paprsku	[m]

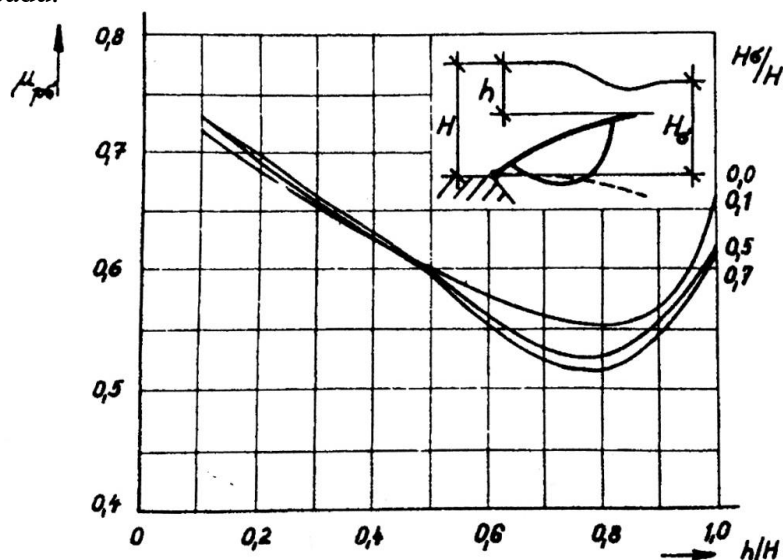
Nedokonalý čili zatopený přepad vzniká, pokud hladina dolní vody má vliv na kapacitu jezu. Pokud je úroveň hladiny dolní vody výše než přelivná hrana, vzniká zatopení. Hladina dolní vody stoupá při růstu průtoku rychleji než hladina horní vody. Je známo více forem nedokonalých přepadu dle výšky dolní vody, při nichž dochází ke vzdutým nebo vlnovitým vodním skokům. Pokud přidáme do rovnice (3.3) dokonalého přepadu redukční součinitel, získáme rovnici průtoku při nedokonalém přepadu.

$$Q = \sigma_z \cdot \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot b_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h_0^{\frac{3}{2}} \quad (3.4)$$

Kde:	Q	Průtok	[m ³ /s]
	σ _z	Součinitel zatopení	[-]
	μ	Součinitel přepadu	[-]
	b ₀	Účinná šířka pole přelivu	[m]
	g	Tíhové zrychlení	[m/s ²]
	h ₀	Energetická výška přepadového paprsku	[m]

Hodnota součinitele zatopení σ_z je závislá na výšce dolní vody. Pro různé tvarově odlišné typy přelivů byly hodnoty σ_z experimentálně naměřeny. Na *Obr. 3.7 – Graf pro*

rozšířený redukční součinitel dle výšky přepadového paprsku jsou zobrazeny hodnoty rozšířeného redukčního součinitele $\mu_{p\sigma}$ klapkových jezových uzávěrů v různých polohách v závislosti na poměru výšek horní vody a přepadového paprsku při různých výškách hladiny dolní vody. Rozšířený redukční součinitel $\mu_{p\sigma}$ slučuje hodnotu součinitele zatopení a součinitel přepadu.



Obr. 3.7 – Graf pro rozšířený redukční součinitel dle výšky přepadového paprsku[4]

Součinitel zatopení pro klapkové uzávěry určený z Obr. 3.7 – Graf pro rozšířený redukční součinitel dle výšky přepadového paprsku se stanoví z rovnice:

$$\sigma_z = \frac{\mu_{p\sigma}}{\mu} \quad (3.5)$$

Kde:	$\mu_{p\sigma}$	Rozšířený redukční součinitel	[-]
	μ	Součinitel přepadu	[-]
	σ_z	Součinitel zatopení	[-]

Pokud se šířka přívodního kanálu rovná šířce přelivu, můžeme přepad uvažovat bez bočních kontrakcí. Pokud je šířka přívodního kanálu větší než šířka přelivu, musíme uvažovat boční kontrakce proudu. U pohyblivých jezů je světlá šířka rozdělena na jednotlivá jezová pole pomocí pilířů, které vyčnívají z vody. Pilíře svým půdorysným tvarem vytvářejí při obtékání vody negativní účinky. Patří mezi ně např.: vzduť hladiny vody před jezem, kontrakce přepadajícího proudu a namáhání pilířů proudovým odporem. U nepříznivých tvarů pilířů dochází u zhlaví k odtrhávání proudu a ke vzniku vírových oblastí. Boční kontrakce přepadajícího proudu způsobují zúžení efektivní šířky přelivné plochy a zmenšují průtočnou kapacitu jezu. Návrhem vhodného půdorysného tvaru pilíře lze dosáhnout snížení bočních kontrakcí. Minimální boční kontrakce vyvolávají pilíře s

proudnicovým tvarem, které mají poměr délky k šířce v rozmezí 3 až 3,5. Na průtočnou kapacitu jezu mají vliv i břehová křídla krajních polí. Při správném výpočtu průtoku přes jez musíme uvažovat místo celé šířky pouze účinnou šířku přelivné plochy mezi pilíři. Účinná šířka lze stanovit dle vzorce:

$$b_0 = b - 0,1 \cdot \xi \cdot n \cdot h_0 \quad (3.6)$$

Kde:	b_0	Účinná šířka přepadu	[m]
	b	Světlá šířka přepadu	[m]
	n	Počet míst bočních kontrakcí	[ks]
	ξ	Tvarový součinitel	[-]
	h_0	Energetická výška přepadového paprsku	[m]

Energetická výška před přelivem v sobě zahrnuje výšku přepadového paprsku v neovlivněné vzdálenosti před přelivem a rychlostní výšku rychlosti proudění před přelivem. Neovlivněná výška přepadového paprsku se nachází přibližně ve vzdálenosti 3 až 4 násobku výšky přepadového paprsku.

$$h_0 = h + \frac{\alpha_i \cdot v_0^2}{2 \cdot g} \quad (3.7)$$

Kde:	h_0	Energetická výška přepadového paprsku	[m]
	h	Výška neovlivněného přepadového paprsku	[m]
	v_0	Rychlost proudění před přelivem	[m/s]
	α_i	Coriolisovo číslo zohledňující tvar koryta	[-]
	g	Tíhové zrychlení	[m/s ²]

Rychlost proudění před přelivem lze pro dlouhé zdrže, kde je rychlost proudění velmi malá určit pomocí vzorce:

$$v_0 = \frac{\left(0,15 \cdot h^{\left(\frac{3}{2}\right)}\right)}{(h+H)} \quad (3.8)$$

Kde:	v_0	Rychlost proudění před přelivem	[m/s]
	h	Výška přepadového paprsku	[m]
	H	Výška hradící konstrukce	[m]

Součinitel přepadu μ zohledňuje ve vzorci (3.3) typ přelivné plochy. Přepadový součinitel není konstantní, jeho hodnota je ovlivněna výškou přepadového paprsku, tvarem a povrchovou úpravou přelivné plochy. Součinitel přepadu byl v minulosti experimentálně stanoven v hydrotechnických laboratořích pro tvarově různé pohyblivé i nepohyblivé

přelivy. Hodnoty součinitele rostou s výškou přepadového paprsku a dosahují bezrozměrných hodnot $\mu = 0,537$ až $0,825$. Výhodnější, z hlediska průtočné kapacity, jsou součinitele vyšší. Součinitel přepadu μ se velmi často slučuje se zlomkem $\frac{2}{3}$ do pomocného součinitele m pro zjednodušení zápisu základní rovnice (3.3).

$$m = \frac{2}{3}\mu \quad (3.9)$$

Kde:	m	Pomocný součinitel	[-]
	μ	Součinitel přepadu	[-]

Pro základní proudnicové přelivné plochy je součinitel přepadu často vyjádřen vzorci nebo tabulkami. Na proudnicové ploše vznikají tlaky či podtlaky v závislosti na výšce přepadového paprsku. Při růstu tlaku na přelivné ploše se hodnota součinitele přepadu zmenšuje. Naopak při podtlacích se hodnota součinitele přepadu výhodně zvyšuje. Pro Smetanovu proudnicovou přelivnou plochu je pro nižší průtoky stanoven pomocný součinitel přepadu m pomocí vzorce:

$$m = 0,499 \cdot \left(0,63 + 0,37 \cdot \sqrt{\frac{h}{h_n}} \right) \quad (3.10)$$

Kde:	m	Pomocný součinitel	[-]
	h_n	Návrhová výška přepadového paprsku	[m]
	h	Skutečná výška přepadového paprsku	[m]

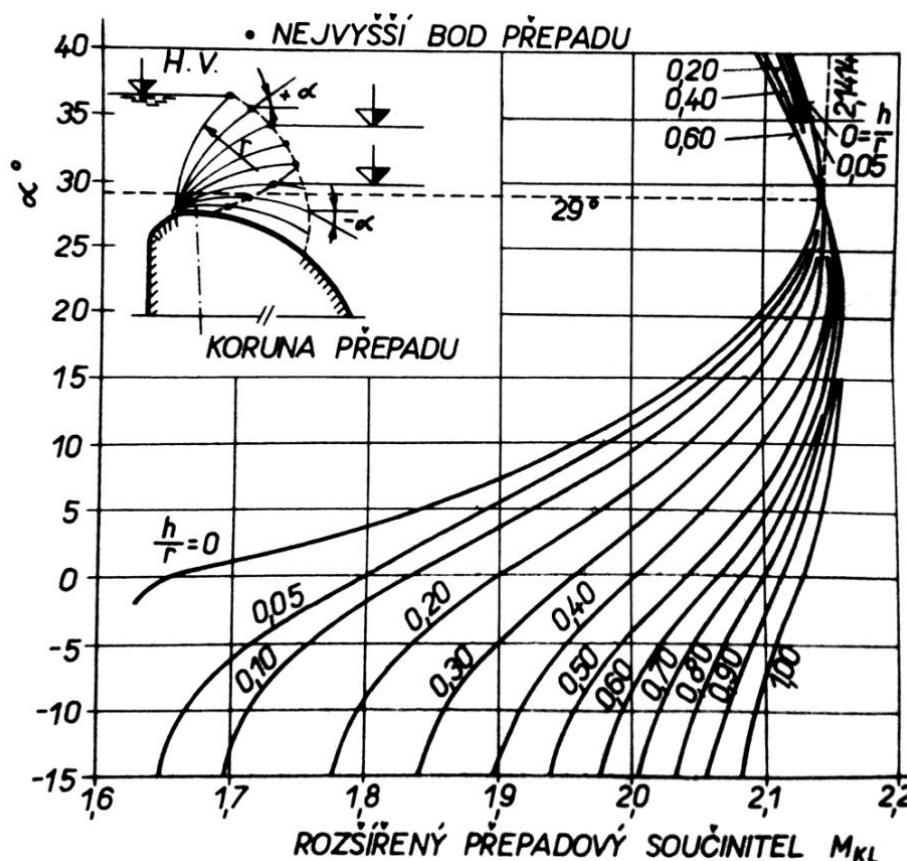
Pro pokloповé uzávěry, mezi které patří i dutá klapka, byl experimentálně stanoven rozšířený součinitel přepadu M_{KL} . Hodnota součinitele M_{KL} dutých klapek se mění v závislosti na výšce přepadového paprsku. Z *Obr. 3.8 – Graf závislosti rozšířeného přepadového součinitele* lze určit rozšířený přepadový součinitel dle závislosti na úhlu sklopení α , poloměru zaoblení hradící stěny R a výšce přepadového paprsku h . Úhel α je definován jako úhel mezi tečnou vrcholu přelivné plochy s vodorovnou přímkou. V této práci je vždy značen jako úhel α .

V české literatuře [6] je dále uváděn vzorec pro výpočet rozšířeného přepadového součinitele při jiných výškách přepadového paprsku, než návrhových:

$$M_L = M_{KL} \cdot \left(\frac{h}{h_0} \right)^{0,17} \quad (3.11)$$

Kde:	M_L	Rozšířený přepadový součinitel pro jiné než návrhové výšky přepadového paprsku	[-]
------	-------	---	-----

M_{KL}	Rozšířený přepadový součinitel pro návrhové výšky přepadového paprsku	[-]
h	Výška přepadového paprsku jiná než návrhová	[m]
h_0	Výška návrhového přepadového paprsku	[m]



Obr. 3.8 – Graf závislosti rozšířeného přepadového součinitele[6]

V Německé literatuře [21] již pomocný vzorec (3.11) není uváděn pro stejný graf závislosti rozšířeného přepadového součinitele. Hodnota rozšířeného přepadového součinitele je určována bez vztahu k návrhové výšce přepadového paprsku. Rozšířený přepadový součinitel M_L i M_{KL} lze vyjádřit pomocí součinitele přepadu μ takto:

$$M_{KL} = \frac{2}{3} \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g} \quad (3.12)$$

Kde:	M_{KL}	Rozšířený přepadový součinitel pro návrhové výšky přepadového paprsku	[-]
	μ	Součinitel přepadu	[-]
	g	Tíhové zrychlení	[m/s ²]

Na uzávěry poklopových jezů dlouhodobě nebo krátkodobě působí různá zatížení způsobená okolními vlivy. Mechanické účinky vnějších vlivů způsobují celkové zatížení konstrukce, které se skládá z povrchových a vnitřních sil. Zatížení konstrukce jsou proměnná v čase, a proto se musí vyjádřit pomocí pravděpodobnostních charakteristik. Konstrukce uzávěrů se navrhuje tak, aby s dostatečnou pravděpodobností odolaly veškerým vzniklým napětím a přetvořením. Zatížení je vyvoláno tlakovým a rychlostním působením vody, vlastní tíhou konstrukce, prouděním větru, teplotními a objemovými změnami nebo také přitížením ledem. Konstrukci klapky nejvíce zatěžuje voda, která vyvolává buď hydrostatický, nebo hydrodynamický tlak, ale i podtlak na vzdušní straně klapky. Hydrostatický tlak nastává, pokud je stav kapaliny stálý, a je dán rovnicí:

$$p = H \cdot \rho_v \cdot g \quad (3.13)$$

Kde:	p	Hydrostatický tlak	[Pa]
	H	Hloubka vody	[m]
	ρ_v	Měrná hmotnost vody	[kg/m ³]
	g	Tíhové zrychlení	[m/s ²]

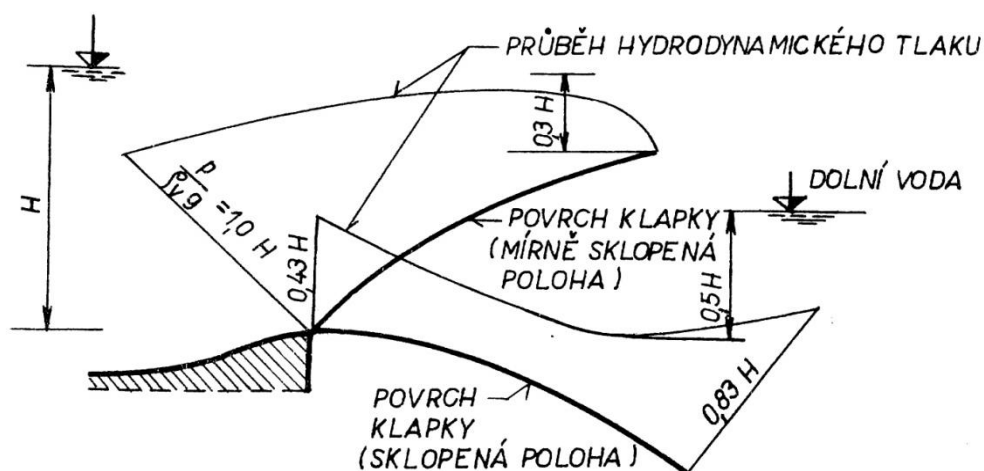
Při výpočtu zatížení od hydrostatického tlaku je nutné stanovit hydrostatickou sílu a její působíště. Hydrostatickou sílu na metr běžný konstrukce lze stanovit z plochy výsledného zatěžovacího obrazce tlaku, který lze určit ze zatěžovacích obrazců vodorovné a svislé složky hydrostatického tlaku. Hydrostatická síla vždy působí z těžiště zatěžovacího obrazce kolmo na zatěžovanou konstrukci. Po úpravě má vzorec pro hydrostatickou sílu tvar:

$$F_h = \delta \cdot \rho_v \cdot g \quad (3.14)$$

Kde:	F_h	Hydrostatická síla	[kN]
	δ	Plocha výsledného zatěžovacího obrazce	[m ²]
	ρ_v	Měrná hmotnost vody	[kg/m ³]
	g	Tíhové zrychlení	[m/s ²]

Hydrodynamický tlak vzniká při proudění vody, při působení vln nebo působením paprsku při přepadání vody. Voda proudící okolo konstrukce na ni vyvoluje normálové a tangenciální složky tlaku. Velikost hydrodynamického tlaku závisí na velikosti změny směru proudění vyvolané konstrukcí. Hydrodynamický tlak se kvůli svým pulsacím musí vyjadřovat jako střední hodnota tlaku a okamžitá složka pulsace. Hydrodynamický tlak na konstrukce byl v minulosti zjišťován pomocí fyzikálních modelů. V dnešní době jej lze

určit pomocí matematických modelů. Na Obr. 3.9 – *Hydrodynamický tlak na klapce* je zobrazen příklad průběhu hydrodynamického tlaku na schematicky vyobrazené duté klapce.



Obr. 3.9 – Hydrodynamický tlak na klapce[2]

Hydrodynamickou sílu lze určit podobným způsobem jako v případě hydrostatické síly. Zatěžovací obrazec se v případě dynamické síly získá integrací průběhu tlaku po rovinné ploše o stejné délce, jakou má skutečná zakřivená hradící stěna. Hodnoty dříve naměřených hydrodynamických tlaků, použité v této práci jako výchozí data pro porovnání s hodnotami získanými matematickým modelem, jsou platné pouze pro typizovanou dutou klapku, která hradí výšku $H = 1$ m a délka konstrukce je uvažována 1 m. Pro typizované klapky s jinou hradící výškou je možné hodnoty tlaků na metr běžný konstrukce přepočítat pomocí vztahu modelové podobnosti.

$$p = p_m \cdot \lambda \quad (3.15)$$

Kde:	p	Tlak na konstrukci se skutečnou hradící výškou	[Pa]
	p_m	Tlak získaný modelovým výzkumem	[Pa]
	λ	Součinitel modelové podobnosti	[-]

Součinitel modelové podobnosti lze určit dle vztahu:

$$\lambda = \left(\frac{H}{H_m} \right) \quad (3.16)$$

Kde:	H	Hradící výška skutečná	[m]
	H_m	Hradící výška jednotkového modelu	[m]

Hydrostatická i hydrodynamická síla od účinků vody vyvolává působením na rameni r od osy otáčení sklopný moment. Fyzikálním modelovým výzkumem bylo v minulosti zjištěno, že největší sklopný moment od hydrodynamické síly bez vlivu dolní

vody na metr běžný konstrukce působí při sklopení duté klapky o 60 % hrazené výšky. Pro zjištění sklopného momentu z působící síly pro celou délku konstrukce lze použít jednoduchý vzorec:

$$M = F \cdot r \quad (3.17)$$

Kde:	M	Moment od síly	[kNm]
	F	Hydrodynamická nebo hydrostatická síla	[kN]
	r	Rameno od osy otáčení	[m]

Průběhy momentů na klapce lze zobrazit v závislosti na úhlu sklopení ω nebo na úrovni hladiny horní vody pro neměnnou hrazenou výšku. Momenty, lze stejně jako v případě tlaků, přepočítat na jiné hrazené výšky typizovaných klapek s úvahou délky konstrukce 1 m pomocí vztahu modelové podobnosti:

$$M = M_m \cdot \lambda_m \quad (3.18)$$

Kde:	M	Moment na skutečné konstrukci	[kNm/m]
	M_m	Moment zjištěný modelovým výzkumem	[kNm/m]
	λ_m	Součinitel modelové podobnosti	[-]

Součinitel modelové podobnosti lze určit dle vztahu:

$$\lambda_m = \left(\frac{H}{H_m} \right)^3 \quad (3.19)$$

Kde:	H	Hradící výška skutečná	[m]
	H_m	Hradící výška modelová	[m]

Pokud jsou klapky tvarově typizované, lze hodnoty momentů přepočítat i na jiné úhly vztyčení klapky ω při úvaze délky konstrukce 1 m. Přepočet se provádí pomocí délek tětív zaoblení hradícího plechu v příčném řezu.

$$M_\omega = M_{\omega 1} \cdot \left(\frac{s_\omega}{s_{\omega 1}} \right) \quad (3.20)$$

Kde:	M_ω	Moment na klapku s úhlem vztyčení ω	[kNm/m]
	$M_{\omega 1}$	Moment na klapku s úhlem vztyčení ω_1	[kNm/m]
	s_ω	Délka maximální tětivy hradící stěny s úhlem ω	[m]
	$s_{\omega 1}$	Délka maximální tětivy hradící stěny s úhlem ω_1	[m]

Přepadáním vody přes konstrukci klapky dochází k odsávání vzduchu z prostoru na vzdušní straně klapky. Vzniklé podtlaky pod přepadovým paprskem byly v minulosti

měřeny v rámci celkového sklopného momentu působícího na klapku, který zahrnuje i vliv hydrodynamického tlaku. Moment od hydrodynamického zatížení lze zjistit z průběhu tlaků na návodní straně. Celkový sklopný moment byl v minulosti zjišťován při fyzikálním modelovém výzkumu. Pro celou délku konstrukce je definován jako síla působící v pohybovacím mechanismu na rameni k ose otáčení. Sklopný moment způsobený podtlaky na celé délce konstrukce pak lze jednoduše stanovit z rozdílu celkového sklopného momentu a momentu od hydrodynamického zatížení.

$$M_p = M_c - M_h \quad (3.21)$$

Kde:	M_p	Moment od podtlaků na vzdušní straně	[kNm]
	M_c	Celkový sklopný moment	[kNm]
	M_h	Moment od hydrodynamického zatížení	[kNm]

Pro zjednodušené určení působivé síly od podtlaků se předpokládá rovnoměrné rozložení podtlaků na vzdušní straně klapky. Ze známého působivé síly lze stanovit délka ramene k ose otáčení. Výslednice síly od podtlaků pro celou délku konstrukce pak lze určit ze vzorce:

$$F_p = \frac{M_p}{r_p} \quad (3.22)$$

Kde:	F_p	Výslednice podtlaků	[kN]
	M_p	Moment od podtlaků na vzdušní straně	[kNm]
	r_p	Rameno od osy otáčení	[m]

Druhým největším působícím zatížením konstrukce je její vlastní váha. Silové zatížení od hmotnosti klapky pro celou délku konstrukce působí v těžišti uzávěru a stanoví se pomocí základního vzorce:

$$F_g = V \cdot \rho_o \cdot g \quad (3.23)$$

Kde:	F_g	Síla od vlastní tíhy	[kN]
	V	Rozměry konstrukce klapky	[m ³]
	ρ_o	Objemová hmotnost oceli ($\rho=7850$)	[kg/m ³]
	g	Tíhové zrychlení	[m/s ²]

[1,2,4,6,10,21]

3.3 Statické působení

Konstrukce duté klapky je jako celek namáhána posouvajícími silami, ohybovými a kroutícími momenty. Nosný dutý uzavřený průřez klapky působí jako spojitý nosník s

počtem podpor rovnající se počtu čepových ložisek. Spojitý nosník se posuzuje uprostřed rozpětí a nad podporami, protože zde působí nejméně příznivé kombinace zatížení. Na hradící plech působí hlavně zatížení hydrostatického nebo hydrodynamického vodního tlaku. Díky soustavě příčných a podélných výztuh hradící plech působí staticky jako spojitá deska po obvodě uložená. Jsou-li diafragmy umístěny ve větších intervalech, působí hradící plech jako svislý spojitý nosník. Pokud je hradící plech vyztužen jen diafragmami, posuzujeme jej jako spojitý vodorovný nosník. Diafragmy přenáší zatížení do otočných ložisek u dna spodní stavby.

Podélné výztuhy z válcovaných úhelníků nebo T průřezů jsou svisle na klapce rozmístěné symetricky ve stejných intervalech okolo osy hradícího plechu, protože dochází ke změnám zatížení při sklápění klapky. Staticky působí podélníky mezi diafragmami jako částečně vetknuté nosníky. Posuzují se na dvouosou napjatost, protože spolupůsobí s hradícím plechem.

Ložiska klapek jsou namáhána výslednicí od zatížení vodním tlakem a vlastní tíhy, stanovenou z řešení spojitého nosníku rovnoměrně zatíženého. U ložiska na poháněném konci se k zatížení od tlaku vody a vlastní tíhy připojují ještě síly od krouticího momentu a od pohybovacího prvku. Krouticí moment je přenášen konstrukcí až k pohybovanému konci, kde je zachycen silou v hydromotoru a v ložisku. Krajiní ložisko je nejvíce namáháno, proto se navrhuje robustnější. Připevnění ložiska na spodní stavbu musí být patřičné, aby nedošlo k jeho vytržení. Umístění a typ hydromotoru musí být navržené tak, aby vytvořená zdvihová síla na rameni k ose otáčení vyvodila moment větší než je maximální moment od zatížení klapky. Celkový maximální krouticí moment působící na konstrukci klapky se rovná součtu momentů od hydrodynamického tlaku, od vlastní tíhy klapky.

[7]

3.4 Data pro analýzu získaná fyzikálním modelováním v minulosti

Jako výchozí data pro analýzu veličin získaných zjednodušeným matematickým modelem popisující přepad před dutou klapku jsou zvoleny dva fyzikální výzkumy provedené ve vodohospodářské laboratoři Českého vysokého učení technického, Fakulty stavební.

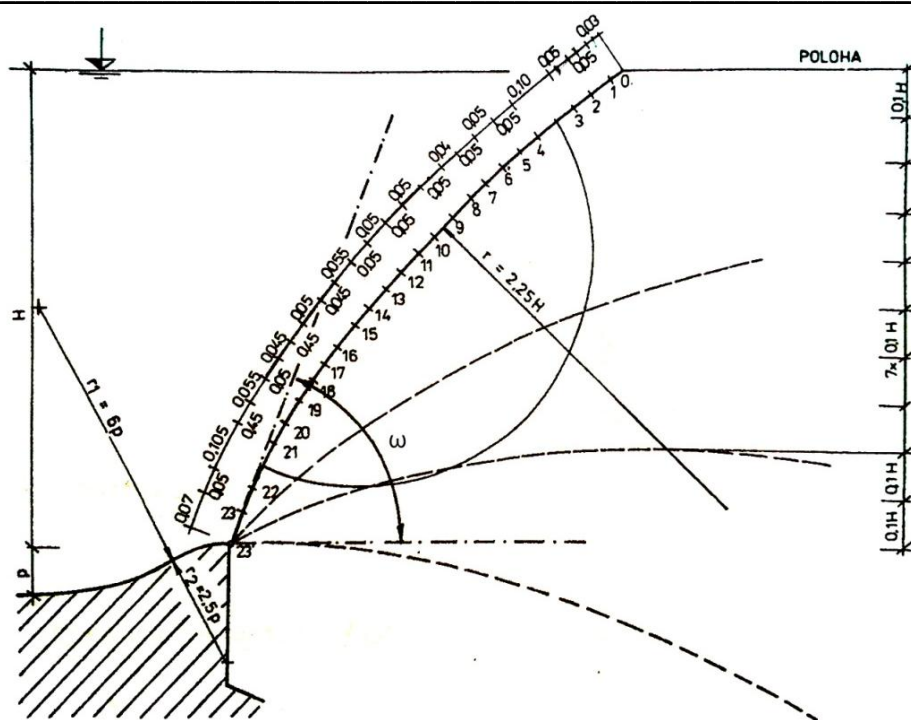
3.4.1 Fyzikální model dle Doc. Průchy

První z výzkumů byl proveden v roce 1986 katedrou hydrotechniky. Měření byla zaměřena na určení průběhů celkových sklopných momentů od hydrodynamického tlaku s vlivem a bez vlivu dolní vody. Prostor pod klapkou byl při těchto měřeních nezavzdušněn. Hodnoty celkových momentů tedy popisují i vliv vzniklých podtlaků pod klapkou. Fyzikální model byl proveden na typizované duté klapce s úhlem ve vztyčené poloze $\omega = 75^\circ$, hradicí výškou $H = 0,15$ m a poloměrem zakřivení hradicího plechu $R=2,25.H$. Úhel ω je úhel vodorovné přímky a tečny k zaoblené hradicí stěně v místě jejího napojení na spodní stavbu. Model klapky byl opatřen nosnou troubou v ose otáčení, ovšem naměřené hodnoty momentů lze přepočítat i na geometricky podobné klapky bez výztužné trouby. Spodní stavba měla tvar horní zaoblené části Jamborova prahu. Celkové sklopné momenty byly stanoveny z hodnot čtených na siloměru a ramen určených posuvným měřítkem. Měření bylo provedeno pro tři různé výšky hladin horní vody. První z nich byla ve výšce H , druhá navýšená o 30 % H a třetí navýšená o 50 % H . Pro odlišné úrovně hladin horní vody byly změřeny různé stavy sklopení klapky o $0,3H$, $0,45H$, $0,6H$, $0,8H$ a plně sklopenou klapku o celé H . Pro analýzu dat získaných matematickým modelem jsou použity pouze hodnoty bez vlivu spodní vody, ale s vlivem podtlaků na vzdušní straně klapky. Celkové sklopné momenty M_c je možné pomocí vzorců (3.18), (3.19) a (3.20) a úpravy ramene k nové ose otáčení přepočítat na celkové sklopné momenty pro dutou klapku bez nosné trouby s hradicí výškou $H = 1$ m a s úhlem ve vztyčené poloze $\omega = 68,1^\circ$. Hodnoty přepočtených celkových sklopných momentů jsou použity pro popsání rozdílu hydrodynamických momentů bez vlivu podtlaků na vzdušní straně klapky a hydrodynamických momentů s vlivem podtlaků při sklápění duté klapky.

[13]

3.4.2 Fyzikální model dle prof. Čábelky

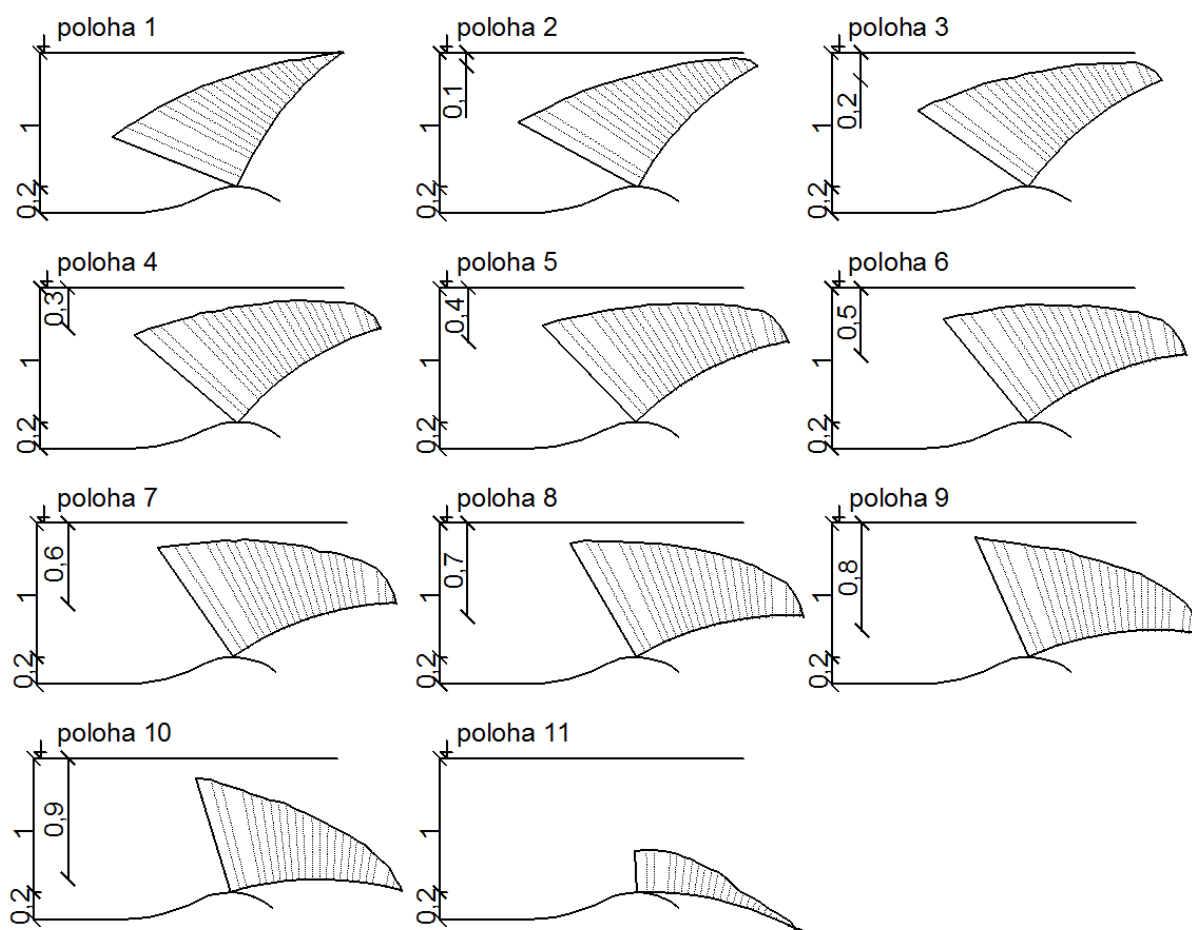
Druhý hydrotechnický výzkum byl katedrou hydrotechniky pod vedením prof. Jaroslava Čábelky proveden v roce 1974. Měření v tomto případě byla zaměřena na zjištění hydrodynamických tlaků na návodní straně klapky s vlivem i bez vlivu dolní vody. Fyzikální model typizované duté klapky byl vytvořen s úhlem ve vztyčené poloze $\omega=68,1^\circ$, hradicí výškou přepočtenou na $H = 1$ m a poloměrem zakřivení hradicího plechu $R=2,25.H$. Hodnoty hydrodynamických tlaků byly měřeny pomocí piezometrů rozmístěných po výšce klapky na hradicím plechu dle *Obr. 3.10 – Schéma příčného řezu zkušební klapky s vyznačeným umístěním piezometrů*.



Obr. 3.10 – Schéma příčného řezu zkušební klapky s vyznačeným umístěním piezometrů

[10, upraveno pro DP]

Bylo provedeno měření hydrodynamických tlaků v jedenácti polohách postupného sklápění klapky při udržování hladiny horní vody na konstantní v úrovni $H = 1$ m nad osou otáčení. Poloha číslo 1 charakterizuje plně vztyčenou klapku $\omega = 68,1$. Postupné sklápění konstrukce bylo realizováno vždy o $0,1H$. V každé poloze byly zjištěny hodnoty hydrodynamických tlaků bez vlivu dolní vody a s vlivem dolní vody. Hladina dolní vody v různých polohách sklopení byla udržována na úrovních násobků hradící výšky vztažené k ose otáčení klapky. Úrovně dolní vody byly uvažovány na $0,0H$, $0,3H$, $0,5H$, $0,7H$ a $0,9H$. Pro analýzu dat zjištěných matematickým modelem jsou použity pouze hodnoty hydrodynamických tlaků na hradicím plechu ve všech jedenácti polohách bez vlivu dolní vody. Hodnoty hydrodynamických tlaků v místech piezometrů jsou udány v m vodního sloupce. Příloha A zobrazuje tabulku s hydrodynamickými tlaky naměřenými při fyzikálním výzkumu, ze kterých jsou početně určeny momenty M_h , zatěžovací síly F_h a jejich ramena r_h . Takto zjištěné zatížení nepodává informaci o podtlacích vzniklých pod klapkou. Na Obr. 3.11 – Průběhy hydrodynamických tlaků zjištěných fyzikálním výzkumem jsou schematicky zobrazené změny průběhu hydrodynamických tlaků na hradicím plechu při postupném sklápění klapky v jedenácti polohách. [8,10]



Obr. 3.11 – Průběhy hydrodynamických tlaků zjištěných fyzikálním výzkumem [Vlastní zdroj]

3.5 Duté klapky v zahraničí

I v zahraničí, především v Evropě, jsou duté klapky také velmi často používanými pohyblivými uzávěry. Ve většině případů jsou konstrukčně shodné s dutými klapkami realizovanými u nás, jen poloměr zakřivení hradicích plechů je při porovnání větší. I v zahraničí byly v minulosti prováděny mnohé výzkumy na modelech a měření na již postavených dílech, jejichž snahou bylo zjistit zatížení od vody proudící přes konstrukci duté klapky. Bohužel tvary konstrukcí použitých klapek nebyly shodné s tvarem konstrukce naší typizované klapky. Lze ovšem říci, že při dokonalém zavzdušnění prostoru pod přepadovým paprskem jsou průběhy tlaků na hradicím plechu klapky shodné.

Na sever od vás, ve Spolkové republice Německo, se klapkové uzávěry používají pro hrazené výšky v rozmezí $H = 1,7 - 6$ m. Do hrazených výšek 2 m se šířka jednoho pole navrhuje až do 40 m, u vyšších hrazených výšek se šířka pohybuje okolo 20 - 25 m. Poloměr zakřivení hradicího plechu je navrhován jako $R = (1,7 - 2,8) \cdot H$. Vztyčení klapky, které je definováno úhlem mezi svislou přímkou a tětivou klapky, se pohybuje v rozmezí $20^\circ - 30^\circ$. Dutá klapka s nejdelším jezovým polem o délce 100 m byla použita na Dunaji

u St. Pantaleon v Rakousku. Nejvyšší dutá klapka byla použita ve Švýcarsku v Barenburgu.

Ve Spolkové republice Německo byl v minulosti definován postup pro určení hydrodynamického sklopného momentu od proudění vody bez použití fyzikálního či matematického modelování. Postup byl publikován Wickertem a Schmaußerem v knize [21] a je založený na informacích zjištěných při fyzikálních výzkumech. Toto řešení umožňuje určit momenty pro klapky s různými poloměry zakřivení hradícího plechu, různou hradící výškou a různými přepadovými paprsky při různém sklopení konstrukce. Podstatou metody je převedení reálné konstrukce na model pomocí měřítka faktoru k . Hodnotu faktoru k je možné určit ze vzorce:

$$k = \frac{l_n}{l_m} \quad (3.24)$$

Kde: l_n Délka oblouku reálné konstrukce [cm]

l_m Délka oblouku na modelu [cm]

Kde je délka oblouku na modelu určena jako 17,5 cm. Poloměr zakřivení na reálné konstrukci se převede na poloměr zakřivení na modelu vzorcem:

$$R_m = R_n \cdot k \quad (3.25)$$

Kde: R_n Poloměr zakřivení reálné konstrukce [cm]

R_m Poloměr zakřivení modelu [cm]

Stejným způsobem se určí i výška přepadového paprsku na modelu.

$$h_m = h_n \cdot k \quad (3.26)$$

Kde: h_n Reálná výška přepadového paprsku [cm]

h_m Modelová výška přepadového paprsku [cm]

Pomocí tří grafů zobrazených v Příloze B, C a D, které popisují závislost výšky přepadového paprsku na modelu, úhlu sklopení konstrukce ω a hydrodynamického momentu, jsou určeny tři hodnoty momentu pro modelové konstrukce s poloměry zakřivení hradícího plechu $R_{M1} = 15$ cm, $R_{M2} = 25$ cm a $R_{M3} = \infty$ cm. Hodnotu momentu na modelu reálné konstrukce M_M získáme interpolací dle poloměru zakřivení modelu R_M po přímce mezi hodnotami momentů ze tří grafů. Moment na reálné konstrukci M_N získáme pomocí vzorce:

$$M_n = M_m \cdot \frac{k^3}{10^6} \quad (3.27)$$

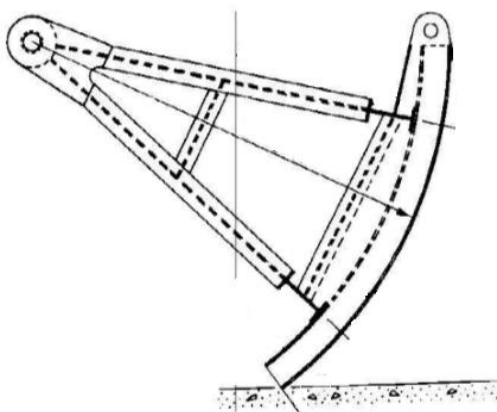
Kde: M_n Hydrodynamický moment na reálné konstrukci [mMp/m]

M_m	Hydrodynamický moment na modelu	[pcm/cm]
k	Faktor měřítka	[-]

Hydrodynamický moment na reálné konstrukci lze převést na hodnotu v kNm vynásobením tíhovým zrychlením, protože mMp/m je starší označení jednotky pro moment při působení síly v pondech.

Mimo Evropu jsou nejčastěji navrhované segmentové pohyblivé uzávěry, které se skládají ze zakřiveného hradícího plechu, výztužných příčníků a podélníků, dvou hlavních vodorovných nosníků a dvou tlačných nebo tažených ramen ukotvených pomocí čepových ložisek do stěn pilířů. Pro zajištění jemné regulace hladiny horní vody se na segmenty velmi často nasazuje dutá klapka, která hradí přibližně třetinu celé výšky.

[5,12, 15,17,21]



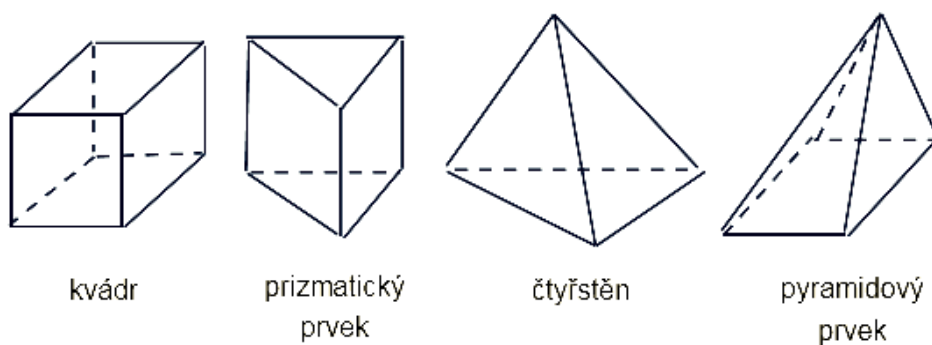
Obr. 3.12 – Schéma segmentového pohyblivého uzávěru [18, upraveno pro DP]

4 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ

4.1 Teorie matematického modelování

Cílem matematického modelování je simulovat skutečný složitý hydraulický jev na modelu. Model je definován jako prostor ohraničený okrajovými podmínkami, ve kterém se hydraulický děj modeluje. Jsou zaváděna nutná zjednodušení a omezení oproti realitě, proto výsledek modelu popisuje skutečnost zkresleně. Rozměrnost modelu může být dle složitosti jevu 3D, 2D a pro nejjednodušší modely 1D. K řešení hydraulických jevů lze použít programové systémy CFX nebo Fluent. K sestavení fungujícího modelu je nutné správně definovat všechna vstupní data a nastavení okrajových podmínek modelu. Matematické modelování spočívá v řešení soustavy parciálních diferenciálních rovnic, které řešíme iterativně pomocí numerických metod. Metoda konečných diferencí, metoda konečných objemů nebo metoda konečných prvků zajišťuje časovou i prostorovou diskretizaci soustavy parciálních diferenciálních rovnic na soustavu algebraických rovnic. Výsledkem řešení rovnic na síti elementů jsou okamžité bodové hodnoty charakteristik proudění.

Výpočetní síť dělí výpočetní prostor na dílčí na sebe navazující 2D buňky nebo 3D buňky. Platí, že na čím více buněk rozdělíme výpočtovou oblast, o to pomalejší bude výpočet. Za kvalitní síť je považována taková síť, která má minimální možné množství geometricky i rozměrově podobných buněk na sebe pravidelně navazujících, které jsou schopné zachytit modelovaný děj. Často se používá plynulé zhuštění sítě v důležitých místech modelu. Často se síť zhušťuje u stěn, kde větší množství buněk zachycuje přechod laminárního proudění na turbulentní v mezní vrstvě. Strukturovaná síť se skládá z obdélníkových nebo křivočarých čtyřúhelníků ve 2D a z kvádrů nebo obecných šestištěnů ve 3D. Nestrukturovaná síť se ve 3D skládá z kvádrů, čtyřštěnů nebo pyramid.



Obr. 4.1 – Tvary konečných objemů[9, upraveno pro DP]

Všechny tvary prvků lze použít v jediné výpočetní síti. Kvalita výpočetní sítě se hodnotí dle velikosti buněk, vhodnosti jejich uspořádání v prostoru a nesouměrnosti buňky proti buňce ideální.

Metoda konečných objemů, kterou použijeme, řeší numerické rovnice v jednotlivých konečných objemech. Řídící rovnice výpočtu jsou rovnice zákona zachování hmotnosti, hybnosti a energie. Dále se používají pomocné semi-empirické vztahy například pro popis vlivu turbulence. Zákon zachování hmotnosti, z kterého vychází rovnice kontinuity má tvar:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left(\frac{\partial(\rho \cdot u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot u_z)}{\partial z} \right) = 0 \quad (4.1)$$

Kde:	ρ	Měrná hmotnost kapaliny	[kg/m ³]
	t	Časový krok	[s]
	u	Bodová rychlost ve směrech x,y,z	[m/s]

Zákon zachování energie pro model stlačitelné kapaliny nebo v případě modelu přenosu tepelné energie v naší úloze nebudeme používat. Zákon zachování hybnosti pro reálnou kapalinu je popisován pomocí Navier-Stokesovy rovnice ve směrech x, y, z. Při pohybu reálné kapaliny se vytváří vnitřní tření, které se projeví jako normálová a smyková napětí působící na povrchu elementu. Navier-Stokesova rovnice pro směr x má tvar:

$$\rho \cdot \frac{Du_x}{Dt} = \rho \cdot o_x + \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) \quad (4.2)$$

Kde:	ρ	Měrná hmotnost kapaliny	[kg/m ³]
	u	Bodová rychlost	[m/s]
	t	Časový krok	[s]
	o_x	Složka tíhového zrychlení ve směru osy x	[m/s ²]
	σ	Normálové napětí	[Pa]
	τ	Tangenciální napětí	[Pa]

Při laminárním proudění lze v Navier-Stokesových rovnicích vyjádřit napětí pomocí Newtonova zákona viskozity ve tvaru:

$$\tau = \mu_d \cdot \left| \frac{du_x}{dy} \right| \quad (4.3)$$

Kde:	τ	Tangenciální napětí	[Pa]
	μ_d	Dynamická viskozita	[Ns/m ²]
	du/dy	Změna rychlosti ve směru y	[m/s]

Po úpravě Navier-Stokesova rovnice ve směru x pro laminární proudění vypadá:

$$\rho \cdot \frac{Du_x}{Dt} = \rho \cdot o_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu_d \cdot \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) \quad (4.4)$$

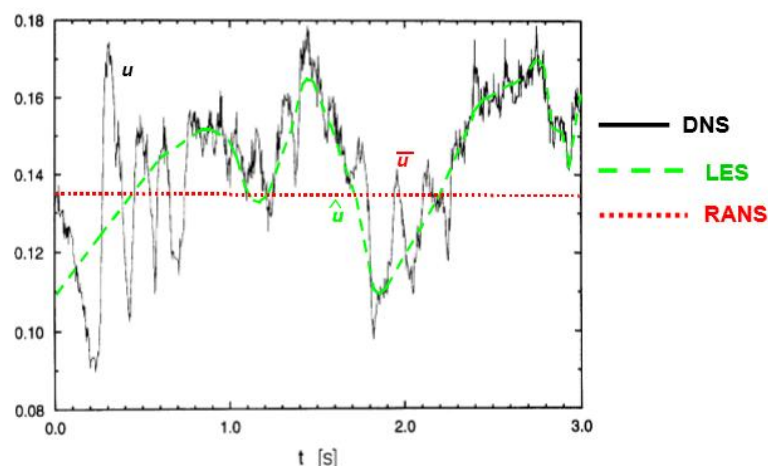
Kde:	ρ	Měrná hmotnost kapaliny	[kg/m ³]
	u	Bodové rychlosti ve směrech x,y,z	[m/s]
	t	Časový krok	[s]
	o_x	Složka tíhového zrychlení ve směru osy x	[m/s ²]
	p	Tlak	[Pa]
	μ_d	Dynamická viskozita	[Ns/m ²]

Laminárním prouděním označujeme vrstevnaté proudění, kdy se částice tekutiny pohybují po souběžných tenkých vrstvách konstantní rychlostí a nedochází k přemísťování částic mezi vrstvami. Naopak při složitějším turbulentním proudění dochází k narušení vrstev turbulentními víry, které přenáší částice a hybnost. K narušení laminárních vrstev dojde při větších rychlostech proudění, kdy vzrůstá smykové napětí mezi vrstvami a viskozita kapaliny je již nedokáže tlumit. Bodové rychlosti částic a bodové tlaky se nepravidelně mění vlivem vzniklých turbulencí. Kritériem pro stanovení, zda je proudění laminární nebo turbulentní, je Reynoldsovo číslo. Pokud je Reynoldsovo číslo menší než 2300, jedná se o laminární proudění.

$$Re = \frac{v \cdot L}{\nu} \quad (4.5)$$

Kde:	v	Rychlost proudění	[m/s]
	L	Šířka žlabu či trubice	[m]
	ν	Kinematická viskozita	[m ² /s]

Při matematickém modelování turbulentního proudění je snahou získat informace o prostorových strukturách turbulence a jejich vývoji v čase. Existují tři teoreticky odlišné přístupy pro simulaci turbulencí, které ji zjednodušují. Jsou jimi metoda přímé simulace DNS, metoda velkých vírů LES a metoda časového středování RANS.



Obr. 4.2 – Schéma průběhu výpočtu dle různých metod simulace turbulence [9, upraveno pro DP]

Metoda přímé numerické simulace hledá řešení pohybových rovnic pro okamžité hodnoty veličin. Nepoužívá žádný zjednodušující turbulentní model nebo rozdělení rychlosti na střední a flukuační složku. Velikost nejmenších elementů v síti musí být taková, aby zachytila i ty nejmenší turbulence. Pro svou výpočetní náročnost zatím nemá využití v inženýrských aplikacích.

Metoda velkých vírů je kompromisem mezi DNS a RANS. Pohybové rovnice řeší stejně jako předcházející metoda, jen s rozdílem, že elementy výpočetní sítě jsou větší. Malé turbulence, které nejsou popsány z důvodu velikosti elementů, jsou popisovány doplňkovým modelem.

V inženýrských aplikacích je nejčastěji využívána metoda časového středování. Matematické řešení zjednodušuje rozdělením rychlosti na střední a flukuační složku a zstředněním hodnot tlaku. Výpočet se doplňuje o model turbulence popisující vliv flukuačních složek veličin. Modely turbulence jsou založeny na hypotéze analogie mezi viskozitou kapaliny a turbulentní viskozitou. Snahou algebraických, jednorovnicových nebo dvourovnicových modelů je vyjádřit turbulentní viskozitu.

Při vytváření turbulentního modelu je použita metoda časového středování s dvourovnicovým SST turbulentním modelem, který se od ostatních dvourovnicových modelů liší tím, že uvažuje i vliv historie vývoje turbulentní struktury v proudění. Model SST se poblíž stěn chová jako model $k-\omega$ a ve větších vzdálenostech od stěn jako $k-\epsilon$. SST model lépe popisuje mezní vrstvy, odtržení proudu a záporné tlakové spády.

Při výpočtech je velmi důležité získat konvergentní řešení. Ustalování výpočtu se popisuje residui, která udávají rozdíl mezi výsledky rovnice na pravé a levé straně v jednom bodě výpočtu v jednom kroku. Ustálenost modelu při proudění lze ověřit například i z rozdílu průtoku na vstupu a na výstupu z modelu. Analýza a interpretace

výsledků matematického modelu spočívá v porovnání s experimentálně získanými daty nebo s daty získanými empiricky.

[9,14,16,19,23]

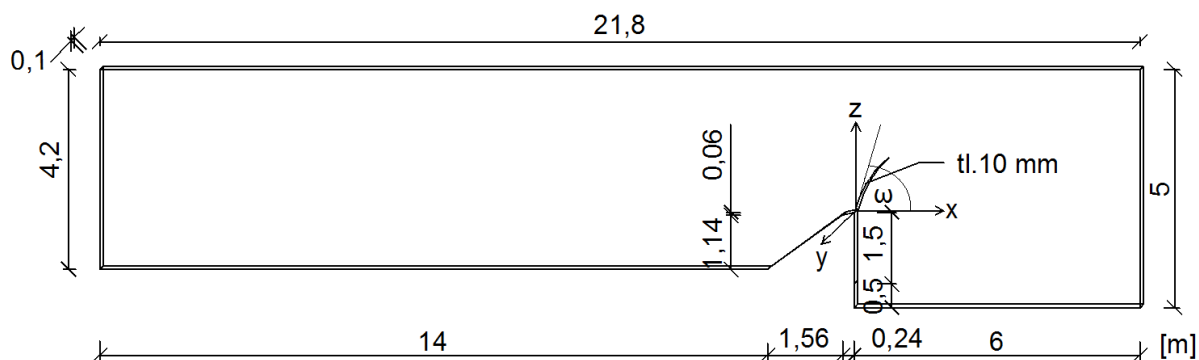
4.2 Tvorba matematického modelu

Tvorba modelu závisí na předem definované představě výstupů, které chceme modelem zjistit. Cílem práce je vytvořit model přepadu přes zjednodušenou konstrukci duté klapky, na němž chceme zjistit průtok přes konstrukci a zatížení hradícího plechu klapky od hydrodynamických tlaků při dokonalém, nezatopeném přepadu. Tyto hodnoty chceme získat pro různé úrovně hladin horní vody při různých polohách sklopení konstrukce duté klapky. Komplexní matematický model se skládá ze sady dílčích modelů, které mají stejné výchozí nastavení okrajových podmínek a výchozí geometrii. Dílčí modely se mezi sebou liší pouze zadanou úrovní hladiny horní vody a různým úhlem sklopení klapky. Bez zavzdušnění prostoru pod přepadovým paprskem by pod klapkou vznikaly nechtěné podtlaky, které by ovlivňovaly přepad vody přes klapku. Prostor pod klapkou musí být ve všech dílčích modelech plně zavzdušněn. Nechceme, aby proudění ovlivňovala hladina spodní vody, proto je výtok ve všech dílčích modelech nadefinován tak, aby se voda pod klapkou nezadržovala.

4.2.1 Geometrie

Prvním krokem při tvorbě matematického modelu je definice výpočetní oblasti pro všechny dílčí modely. V našem případě se jedná o žlab o šířce 0,1 m, ve kterém je umístěna část předpolí, spodní stavba jezu s konkávní kružnicí Jamborova prahu, zjednodušená konstrukce hradícího plechu duté klapky a výtok. Rozměry výpočetní oblasti jsou zobrazeny na *Obr. 4.3 – Schéma výpočetní oblasti modelu*. Předpolí jezu je prohloubeno tak, aby na vtoku do modelu mělo proudění nižší rychlost. Hradící plech klapky je kružnicový oblouk s bodem otáčení na začátku oblouku bez nutných konstrukčních odchylek a je vymodelován jako těleso s tloušťkou 10 mm. Křivost hradícího plechu je navržena stejně jako křivost klapky použitá prof. Čábelkou při fyzikálním měření v roce 1974. Křivost je určena dle vzorce (3.1) při výšce konstrukce $H = 1$ m a úhlu sklopení $\omega = 68,1^\circ$. Úhel ω je definován jako úhel vodorovné přímky a tečny k zaoblené hradící stěně v místě jejího napojení na spodní stavbu. Výchozí stav úhlu sklopení hradícího plechu všech dílčích modelů je oproti klapce prof. Čábelky navýšen o $7,9^\circ$ na hodnotu $\omega = 76^\circ$ (křivost hradícího plechu je zachována; hradící výška je 1,1 m).

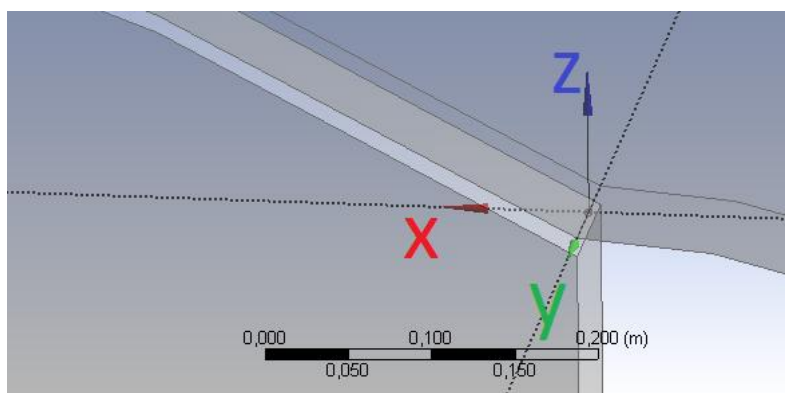
Vrchní plocha omezující výpočetní oblast se nachází 1 m nad předpokládanou maximální hladinou v modelu. Ve svislé stěně pod klapkou a na spodní straně klapky jsou vytvořeny plochy pro budoucí zavzdušnění. Rozměry oblasti podjezí jsou uzpůsobeny k rychlému odtoku vody z modelu. Vnější žlab i konstrukce klapky jsou vykresleny jako oddělená tělesa, z důvodu požadavku programu CFD. Výchozí 3D model žlabu je vytvořen v modelovacím programu Rhinoceros 5.



Obr. 4.3 – Schéma výpočetní oblasti modelu[Vlastní zdroj]

Pro vytvoření komplexního modelu je použit program amerických softwarových vývojářů z Ansys, Inc. Ansys Workbench - CFX. Tato společnost byla založena v roce 1970 Johnem A. Swansonem s názvem Swanson Analysis Systems, Inc. Použitý výpočetní nástroj je vhodný pro modely dynamiky kapalin a poskytuje spolehlivě a rychle přesné řešení v celé škále CFD a multi-fyzikálních aplikací.

Po importu výchozí 3D geometrie do komponentního programu Ansys CFX *Geometry* je počátek soustavy souřadnic umístěn do středu žlabu, do bodu ležícího na ose otáčení klapky. Osa otáčení klapky je definována průsečíkem plochy Jamborova prahu se svrchní plochou tělesa hradícího plechu. Zobrazeno na Obr. 4.4 – Počátek soustavy souřadnic.

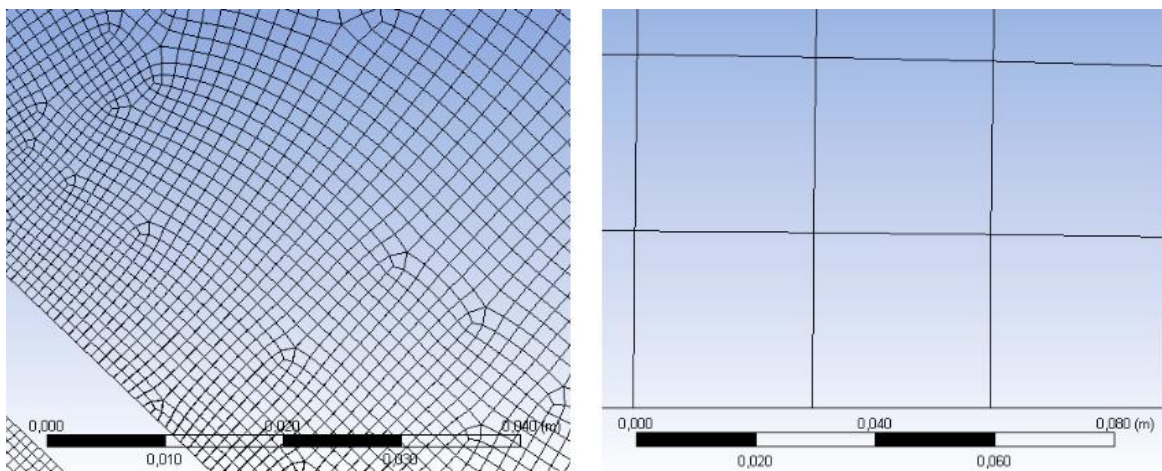


Obr. 4.4 – Počátek soustavy souřadnic[Vlastní zdroj]

Pomocí nástrojů *Rotate* a *Boolean* je umožněno hradicímú plechu klapky sklápění o požadovaný úhel. Nástroj *Rotate* zároveň umožňuje i automatickou parametrizaci sklápění klapky okolo osy otáčení y. Díky tomu jsme schopni nadefinovat řadu dílčích modelů s různou polohou sklopení klapky na jedné výchozí geometrii a při jednom nastavení modelu. Úhel sklopení je jedním z parametrů komplexního modelu. Popis, jak je sklápění klapky prováděno v průběhu výpočtu všech dílčích modelů, je uveden níže. [24,25]

4.2.2 Výpočetní síť

Rozdělení výpočetního prostoru všech dílčích modelů na diskrétní elementy, pro řešení řídicích rovnic pomocí metody konečných objemů, je provedeno v komponentním programu *Mesh* použitého softwarového balíčku. Matematický model přepadu vody přes těleso duté klapky lze zjednodušit zanedbáním rychlosti v kolmém směru na proudění. Všechny dílčí modely jsou definovány stejně, jako 2D díky použití elementů s šířkou shodující se s šířkou žlabu. Výpočetní síť jsou ve všech polohách klapky nestrukturované, vytvořené pouze z šesti-stěnných elementů a to díky použití předdefinované metody *MultiZone*. Velikost a množství elementů je na okrajích geometrie fixně určeno pomocí nástrojů *Sizing edges* a *Sizing faces*. Velikosti stran elementů se pohybují od 0,1 m až po nejmenší 0,00066 m s plynulými přechody. Celkový počet elementů se v dílčích modelech pohybuje okolo 300-600 tis. Výpočetní síť jsou zhuštěny v okolí konstrukce duté klapky, protože zde má proudění vyšší rychlosti, a u dna předpolí. Velikost elementů v blízkosti duté klapky je určena pomocí kalkulátoru velikosti elementů podle nejvyšší rychlosti proudění, dostupného na webových stránkách [26]. Na Obr. 4.5 – *Výpočetní síť modelu* jsou zobrazeny detaily výpočetní sítě v okolí konstrukce duté klapky (nalevo) a na okrajové podmínce výtoku (vpravo) v zobrazeném měřítku na jednom dílčím modelu.



Obr. 4.5 – Výpočetní síť modelu [Vlastní zdroj]

4.2.3 Nastavení a okrajové podmínky

Dále je nutné v komponentním programu *Setup* definovat fyzikální děje vznikající při přepadu a fyzikální vlastnosti tekutin, které kontinuálně vyplňují objem výpočetního prostoru dílčích modelů. Modely jsou vyplněny vzduchem a vodou o teplotě 25°C. Referenční tlak v modelech nad hladinou je nastaven na jednu atmosféru. K určení fyzikálních vlastností použitých tekutin jsou využity předdefinované hodnoty z knihovny materiálů. Díky mnohonásobně vyšší hustotě vody než vzduchu se při zadání směru gravitace vytvoří volná hladina. Pro zkrácení času výpočtu je zanedbána výměna tepelné energie mezi tekutinami nastavením shodné teploty a přeměna kinetické energie na tepelnou energii. Voda je uvažována jako nestlačitelná pouze při tlaku blízkému atmosférickému. Proudění vody v modelech je uvažováno jako homogenní turbulentní. Za turbulentní model je zvolen model SST.

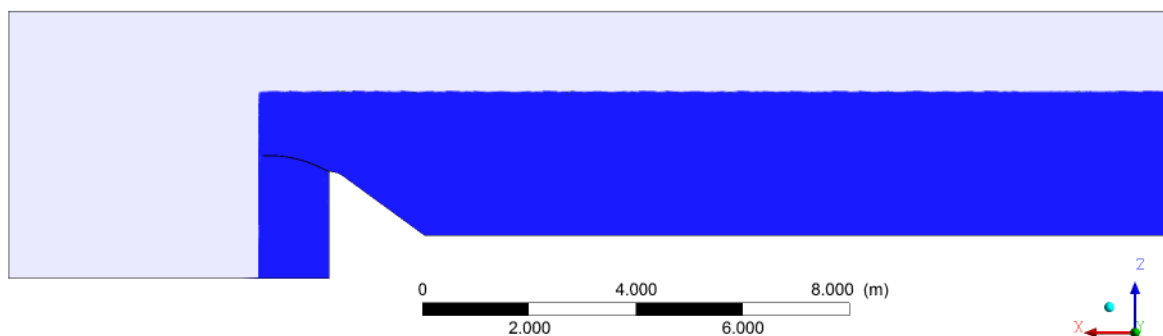
Na hranicích výpočetní oblasti dílčích modelů jsou definovány okrajové podmínky, které popisují vzájemné působení modelu s nemodelovaným okolím. Pro popsání složitějších okrajových podmínek je jednodušší a výhodnější některé hodnoty definovat pomocí výrazů. Na *Obr. 4.6 – Pomocné výrazy* jsou zobrazeny použité výrazy. Pomocné výrazy v modelu určují hustotu použitých tekutin, udávají iniciační rychlost, definují energetickou výšku a polohu požadované hladiny horní vody. Dále definují rozdělení objemu vody a vzduchu a také rozložení tlaku na okrajových podmínkách při iniciaci a po zbytku výpočtu. Pomocné výrazy umožňují automatickou parametrizaci vstupních veličin dílčích modelů. Díky výrazům jsme schopni přiřadit různé úrovně hladiny horní vody, energetické výšky a iniciační rychlosti různým polohám sklopení hradícího plechu klapky.

Expressions	
$\sqrt{\alpha}$ DenH	$DenW-DenRef$
$\sqrt{\alpha}$ DenRef	$1.184[kg*m^{-3}]$
$\sqrt{\alpha}$ DenW	$998[kg*m^{-3}]$
$\sqrt{\alpha}$ IUppress	$(IntH-z)*DenH*g*IVFWater$
$\sqrt{\alpha}$ IVFAir	$step((z-IntH)/1[m])$
$\sqrt{\alpha}$ IVFWater	$1-IVFAir$
$\sqrt{\alpha}$ IntH	$if(x<1.3[m],UpH,-2[m])$
\sqrt{P} Inveloc	$0.039[m*s^{-1}]$
$\sqrt{\alpha}$ UVFAir	$step((z-UpH)/1[m])$
$\sqrt{\alpha}$ UVFWater	$1-UVFAir$
\sqrt{P} UpH	$0.1[m]$
\sqrt{P} UpHTP	$0.1003[m]$
$\sqrt{\alpha}$ Uppress	$(UpHTP-z)*DenH*g*UVFWater$

Obr. 4.6 – Pomocné výrazy[Vlastní zdroj]

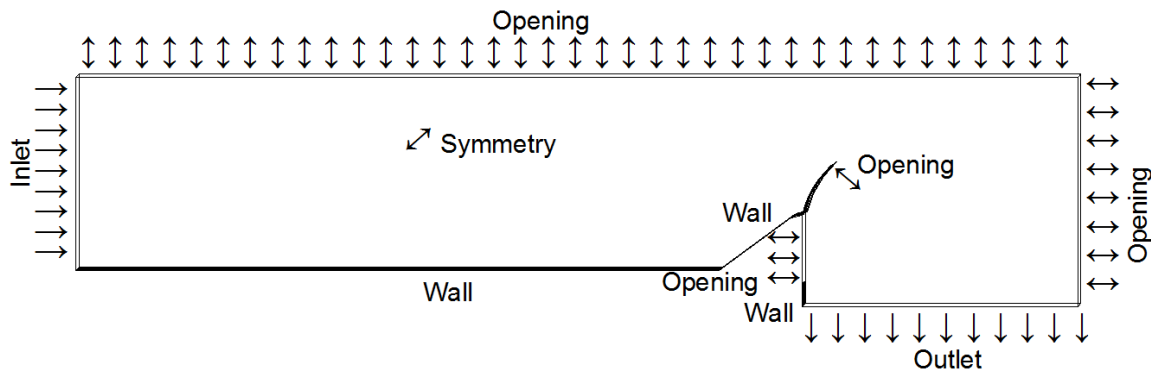
V pomocných výrazech je i definován algoritmus pro stanovení polohy volné hladiny z určení objemu kapaliny v každém elementu. Každému elementu je přiřazena hodnota 0 – 1, kdy 0 znamená, že element neobsahuje kapalinu a 1 znamená, že element je vyplněn kapalinou.

Při iniciačních výpočetních stavech všech dílčích modelů je hydrostatický objem vody umístěn pouze do předpolí jezu a do okolí klapky. Svrchu je objem vody definován požadovanou výškou hladiny horní vody, zespoda hranicí výpočetní oblasti a na bocích je definován vtokem a pomyslnou svislou stěnou ve vzdálenosti 1,3 m od osy otáčení klapky. Iniciační výpočetní stav dílčího modelu je zobrazen na *Obr. 4.7 – Iniciační výpočetní stav*. Na vtoku do modelů je definována iniciační rychlost, která je jedním z parametrů komplexního modelu. Iniciační výpočetní stavy definují pomocné výrazy, jejichž názvy začínají na *I*. Iniciační výpočetní stav zkracuje potřebný čas k výpočtu a umožňuje dosáhnout ustáleného stavu.



Obr. 4.7 – Iniciační výpočetní stav[Vlastní zdroj]

Při výpočtu jednotlivých dílčích modelů jsou hranicím výpočetní oblasti určeny okrajové podmínky, podle toho jak spolupůsobí s okolím. Na *Obr. 4.8 – Schéma okrajových podmínek modelu* jsou zobrazeny druhy a umístění okrajových podmínek na výchozí 3D geometrii modelu.



Obr. 4.8 – Schéma okrajových podmínek modelu[Vlastní zdroj]

Pro všechny dílčí modely přepadu vody přes dutou klapku jsou okrajové podmínky umístěny a nastaveny stejně. Je použito pět typů okrajových podmínek, které jsou definovány takto:

- Inlet – Okrajová podmínka představující vtok tekutin do modelu. Je nutné popsat, které tekutiny na vtoku vstupují do modelu. Vtok tekutin lze definovat průměrnou vtokovou rychlostí nebo rychlostním profilem, hydrostatickým tlakem, Total Pressure nebo hmotnostním průtokem.

V dílčích modelech přepadu vody přes dutou klapku je okrajová podmínka vtoku nastavena pro vodu a vzduch pomocí Total Pressure. Je tak simulován nátok vody na jez ze zdrže. Pomocný výraz $Uppress$ určuje Total Pressure z předvypočítané energetické výšky Up_{HTP} . Hodnoty Up_{HTP} jsou jedním z parametrů komplexního modelu. Objemový podíl pro vzduch i vodu je určen pomocnými výrazy $UVFAir$ a $UVFWater$, kde UpH je požadovaná výška hladiny horní vody před klapkou a je dalším parametrem komplexního modelu.

$$UVFAir = step((z-UpH)/1[m])$$

$$UVFWater = 1-UVFAir$$

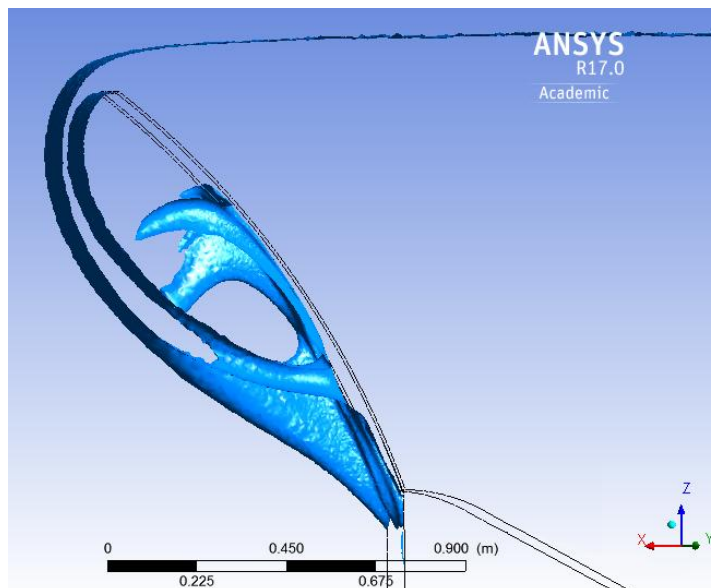
$$Uppress = (Up_{HTP}-z)*DenH*g*UVFWater$$

- Opening – Otevřená okrajová podmínka dovoluje výstup i vstup tekutin z a do modelu. Tok tekutin do a z modelu lze definovat hodnotou tlaku nebo rychlostí. Směr proudění lze definovat pomocí směrových vektorů. Je nutné popsat, které tekutiny mohou pronikat otevřením. Objemový podíl vody a vzduchu je při proudění s volnou hladinou definován 1 pro vzduch a 0 pro vodu. Otevřená okrajová podmínka se velmi často využívá u modelů s prouděním o volné hladině.

Umístění okrajové podmínky opening v dílčích modelech přepadu vody přes dutou klapku je zobrazeno na *Obr. 4.8 – Schéma okrajových podmínek modelu*. Všechny okrajové podmínky otevření jsou nastaveny hodnotou tlaku 0 Pa, protože je již nastaven referenční tlak v modelech na jednu atmosféru. Otevřenými okrajovými podmínkami může pronikat pouze vzduch.

Při přepadu vody přes klapku vzniká pod přepadovým paprskem podtlak. Aby došlo k zavzdušnění prostoru pod přepadovým paprskem, jsou pod klapku umístěny dvě samostatné okrajové podmínky otevření. Větší z nich se nachází ve svislé stěně pod klapkou a představuje náhradu za zavzdušňovací potrubí umístěné

v pilířích. Druhá, pomocná, menší, zavzdušňovací okrajová podmínka otevření se nachází na spodní straně hradícího plechu klapky. Pomocný opening bylo nutné umístit do konstrukce plechu, protože při výpočtech některých dílčích modelů docházelo ke strhávání přepadového paprsku podtlaky pod klapku, ke kterému reálně nedochází. Zobrazeno na Obr. 4.9 – Strhávání přepadového paprsku.



Obr. 4.9 – Strhávání přepadového paprsku[Vlastní zdroj]

- **Wall** – Okrajová podmínka, která neumožňuje tekutině v modelu jej opustit. Stěny simulují reálné, pevné, neproniknutelné překážky. Okrajové podmínce se definuje drsnost jejího povrchu. Při použití neprostupné stěnové podmínky je nutné správně popsat proudění v její blízkosti. Použitý turbulentní dvourovnicový model SST dobře popisuje proudění v blízkosti stěn na dostatečně jemné výpočetní síti.

V dílčích modelech přepadu vody přes dutou klapku jsou stěnové okrajové podmínky umístěny na dně předpolí, na spodní stavbě jezu, na zjednodušeném hradícím plechu duté klapky a na svislé stěně pod klapkou pod zavzdušňovacím otevřením. Zobrazeno na Obr. 4.8 – Schéma okrajových podmínek modelu. Stěnové okrajové podmínky jsou definovány jako *No slip Wall*, tedy nekluzké stěny. Drsnosti stěn jsou nastaveny jako hladké.

- **Outlet** – Okrajová podmínka představující výtok tekutin z modelu. Na výtoku veškeré tekutiny opouští model. Výtok tekutin lze definovat průměrnou výtokovou rychlostí nebo složkami rychlosti ve směrech, hydrostatickým tlakem, Total Pressure nebo hmotnostním průtokem.

V dílčích modelech přepadu vody přes dutou klapku je okrajová podmínka výtoku definována pomocí průměrného statického tlaku rovnajícího se 0 Pa. Modely jsou vytvořeny tak, aby spodní voda pod klapkou neovlivňovala zatížení klapky od horní vody.

- Symmetry – Okrajová podmínka symetrie umožňuje zjednodušit geometrii modelu potřebnou k výpočtu. Pomocí symetrie lze vyjmout část výpočetního prostoru, která je osově či rovinně symetrická s ponechanou částí výpočetního prostoru. Při vizualizaci výsledků získaných výpočtem na zjednodušené části lze výsledky promítat i na části symetrické.

3D konstrukce duté klapky je v podélném směru stejná, symetrická v rovině příčného řezu. Proto v dílčích modelech přepadu vody přes klapku je okrajová podmínka symetrie použita na bocích modelovaného žlabu. Došlo tak ke zjednodušení 3D problému na 2D. Vykreslení výsledků získaných 2D modelem lze rozšířit i pro 3D dutou klapku.

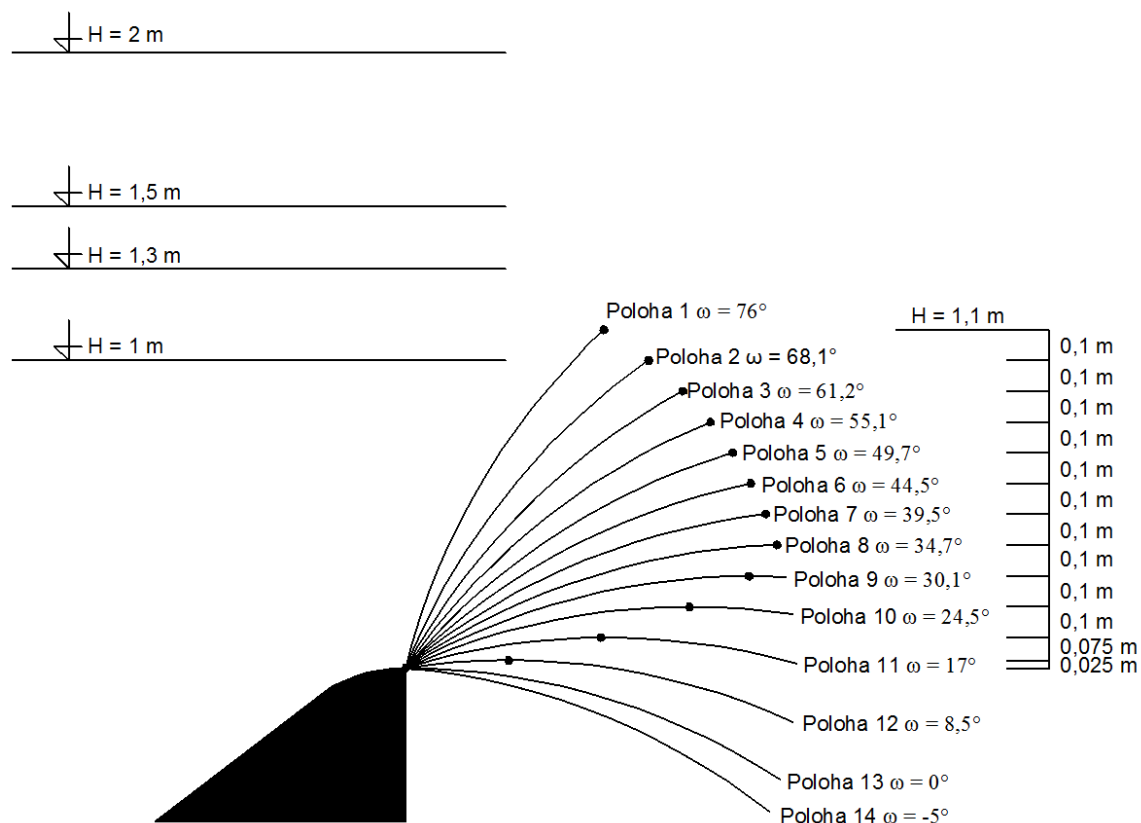
Časový krok výpočtu dílčích modelů je nastaven na konzervativní Auto Timescale s redukčním faktorem 0,5. Tedy při výpočtech je programem zároveň odhadován vhodný časový krok pro nejrychlejší ustálení výpočtů, který je násoben hodnotou 0,5. Nutný počet iterací pro ustálení výpočtu není ve všech dílčích modelech stejný. Pro dosažení dostatečné přesnosti dílčích výpočtů musí být hodnota průměrných residuí pod $1,0e^{-4}$.

[16,22]

4.2.4 Parametrizace

K zjednodušení tvorby a urychlení výpočtu komplexního modelu je použita parametrizace vstupních dat. Hlavními parametry komplexního modelu jsou úhel sklopení klapky a výška hladiny horní vody. Volba posuzovaných stavů modelu vychází z fyzikálních měření prof. Jaroslava Čábelky provedených v roce 1974, popsanych v kapitole 3.4.2. Komplexní model je oproti fyzikálnímu modelu prof. Čábelky rozšířen o tři polohy sklopení klapky. Celkem se komplexní model skládá ze 14 poloh sklopení klapky. Polohy 2 až 11 a 13 se shodují s fyzikálním modelem prof. Čábelky. Tyto polohy jsou sklápěny stejně jako u fyzikálního modelu prof. Čábelky, tedy klapka je postupně sklápěna o výšky 0,1 m. Na *Obr. 4.10 – Schéma sklápění klapky v modelu a konstantní hladiny* jsou zobrazeny jednotlivé polohy sklopení klapky v komplexním modelu. Rozšiřující Poloha 1 je zkonstruována navýšením úhlu vztyčení z $\omega = 68,1^\circ$ na 76° při

zachování křivosti klapky. Klapka v této poloze hradí výšku $H = 1,1$ m. Rozšiřující Poloha 12 je definována úhlem vztyčení $\omega = 8,5^\circ$. Poloha 12 je zařazena do modelu k popisu charakteristik mezi Polohami 11 a 13, kde vznikla mezera posunem vrcholového bodu klapky při sklopení o 0,1m. Hrazená výška klapky v Poloze 12 je $H = 0,025$ m. Rozšiřující Poloha 14 je zkonstruována snížením minimálního úhlu sklopení z $\omega = 0^\circ$ na -5° .



Obr. 4.10 – Schéma sklápění klapky v modelu a konstantní hladiny [Vlastní zdroj]

Stejně jako při fyzikálních měřeních prof. Čábelky je ve 13 polohách sklopení klapky konstantně udržována hladina horní vody na úrovni $H = 1$ m nad osou otáčení klapky. Dále je komplexní model rozšířen oproti fyzikálnímu modelu o vyšší a nižší úrovně hladiny horní vody. Tři použité vyšší úrovně hladin jsou zvoleny jako reakce na stále častěji se vyskytující extrémní stavy hladin. Vyšší úrovně hladin horní vody jsou konstantně udržovány ve všech 14 polohách sklopení klapky. Navýšení hladin horní vody nad $H = 1$ m je realizováno o 30 %, o 50 % a o 100 %, zobrazeno na Obr. 4.10 – Schéma sklápění klapky v modelu a konstantní hladiny. Nižší úrovně hladin horní vody než $H = 1$ m jsou modelovány v Polohách 4-14. Nižší úrovně hladin již nejsou konstantně udržovány. Pro každou polohu sklopení klapky je přiřazeno množství hladin dostačující k následnému popisu charakteristik. V Tab. 4.1 – Parametry úhel sklopení a úroveň hladiny horní vody ve všech dílčích modelech jsou zobrazeny v řádcích úrovně hladin horních vod nad osou otáčení

v jednotlivých polohách klapky. V Tab. 4.2 – Výšky přepadových paprsků v dílčích modelech jsou v řádcích uvedeny výšky přepadových paprsků v dílčích modelovaných stavech.

poloha	ω [°]	Výš. kce [m]	úroveň hladiny horní vody nad osou otáčení klapky [m]							
1	76	1,1	2,00	1,50	1,30	-	-	-	-	-
2	68,1	1,0	2,00	1,50	1,30	1,00	-	-	-	-
3	61,2	0,9	2,00	1,50	1,30	1,00	-	-	-	-
4	55,1	0,8	2,00	1,50	1,30	1,00	0,90	-	-	-
5	49,7	0,7	2,00	1,50	1,30	1,00	0,80	-	-	-
6	44,5	0,6	2,00	1,50	1,30	1,00	0,85	0,70	-	-
7	39,5	0,5	2,00	1,50	1,30	1,00	0,85	0,70	0,60	-
8	34,7	0,4	2,00	1,50	1,30	1,00	0,80	0,60	0,50	-
9	30,1	0,3	2,00	1,50	1,30	1,00	0,70	0,50	0,40	-
10	24,5	0,2	2,00	1,50	1,30	1,00	0,80	0,60	0,40	0,30
11	17,0	0,1	2,00	1,50	1,30	1,00	0,80	0,60	0,40	0,20
12	8,5	0,025	2,00	1,50	1,30	1,00	0,80	0,50	0,30	0,10
13	0,0	0,0	2,00	1,50	1,30	1,00	0,80	0,50	0,30	0,10
14	-5	0,0	2,00	1,50	1,30	1,00	0,80	0,50	0,30	0,10

Tab. 4.1 – Parametry úhel sklopení a úroveň hladiny horní vody všech dílčích modelů

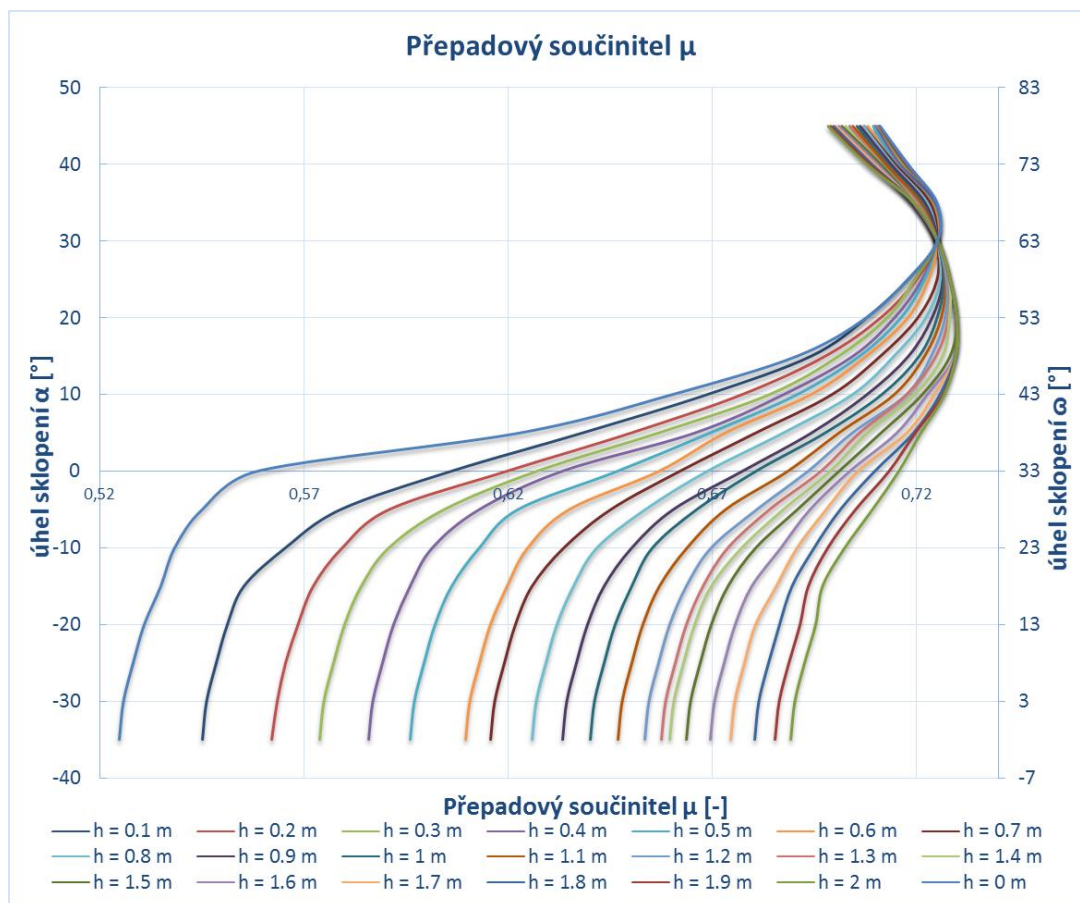
[Vlastní zdroj]

poloha	ω [°]	Výš. kce [m]	výška přepadových paprsků [m]							
1	76	1,1	0,90	0,40	0,20	-	-	-	-	-
2	68,1	1,0	1,00	0,50	0,30	0,00	-	-	-	-
3	61,2	0,9	1,10	0,60	0,40	0,10	-	-	-	-
4	55,1	0,8	1,20	0,70	0,50	0,20	0,10	-	-	-
5	49,7	0,7	1,30	0,80	0,60	0,30	0,10	-	-	-
6	44,5	0,6	1,40	0,90	0,70	0,40	0,25	0,10	-	-
7	39,5	0,5	1,50	1,00	0,80	0,50	0,35	0,20	0,10	-
8	34,7	0,4	1,60	1,10	0,90	0,60	0,40	0,20	0,10	-
9	30,1	0,3	1,70	1,20	1,00	0,70	0,40	0,20	0,10	-
10	24,5	0,2	1,80	1,30	1,10	0,80	0,60	0,40	0,20	0,10
11	17,0	0,1	1,90	1,40	1,20	0,90	0,70	0,50	0,30	0,10
12	8,5	0,025	1,98	1,48	1,28	0,98	0,78	0,48	0,28	0,08
13	0,0	0,0	2,00	1,50	1,30	1,00	0,80	0,50	0,30	0,10
14	-5	0,0	2,00	1,50	1,30	1,00	0,80	0,50	0,30	0,10

Tab. 4.2 – Výšky přepadových paprsků v dílčích modelech [Vlastní zdroj]

Celkem se komplexní model skládá z 88 dílčích modelů přepadu vody přes klapku. Vedlejšími vstupními parametry výpočtů jsou iniciační vtoková rychlost a energetická výška proudění na vtoku. Hodnoty parametrů jsou pro všechny dílčí modely iteračně předvypočítány pomocí vzorců (3.3), (3.7), (3.8), (3.9), (3.12) v programu MS Excel. Hodnoty přepadového součinitele μ , při úhlu sklopení α v rozmezí 40° až -15° , jsou přepočítány z rozšířeného přepadového součinitele M_{KL} pomocí vzorce (3.12), který je odečten z grafu na Obr. 3.8 – Graf závislosti rozšířeného přepadového součinitele. Pro určení hodnot přepadového součinitele μ při úhlu sklopení α jiném, než je rozsah grafu na Obr. 3.8, je extrapolací grafu na Obr. 3.8 dle zavedeného předpokladu vytvořen graf s hodnotami μ . Vytvořený graf je zobrazen na Obr. 4.11 – Extrapolovaný graf pro

přepadový součinitel, kde je přepadový součinitel μ zobrazen v závislosti na úhlu sklopení α a výšce přepadového paprsku h . Závislost přepadového součinitele na křivosti hradícího plechu není na Obr. 4.11 uvažována, protože křivost hradícího plechu je v modelu konstantní $R = 2,25\text{m}$. 3D zobrazení extrapolovaného grafu je v příloze E a tabulka s číselnými hodnotami přepadového součinitele μ v Příloze F. Tabulka se vstupními parametry modelu je zobrazena v Příloze G.

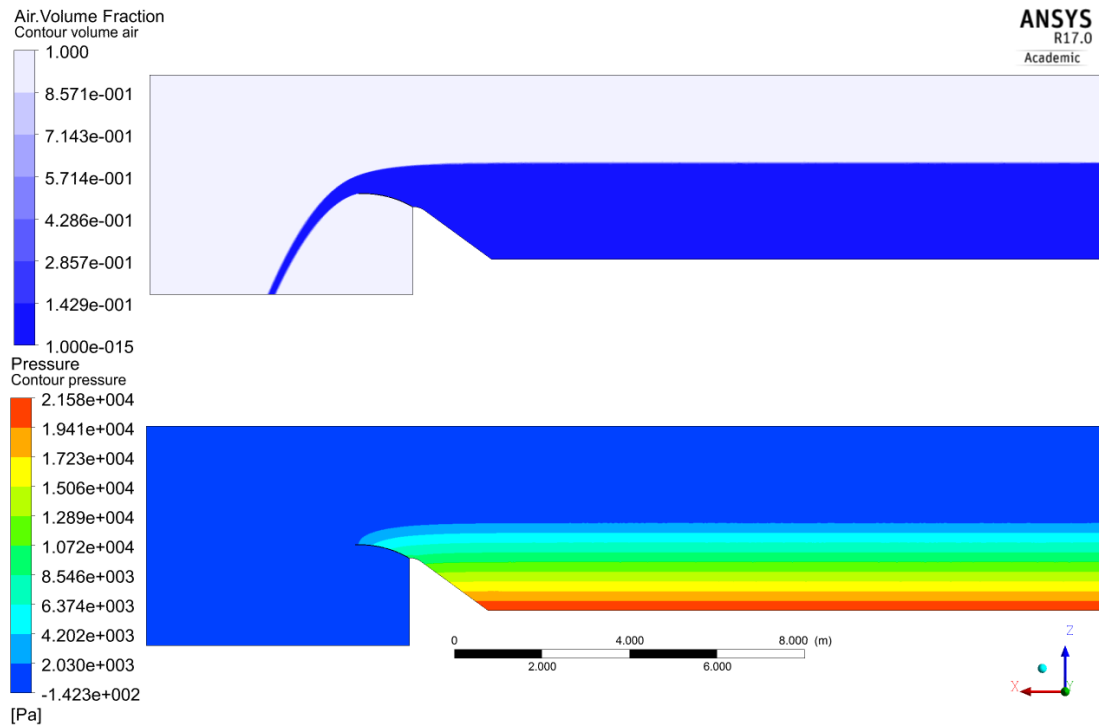


Obr. 4.11 – Extrapolovaný graf pro přepadový součinitel [Vlastní zdroj]

4.2.5 Získaná data

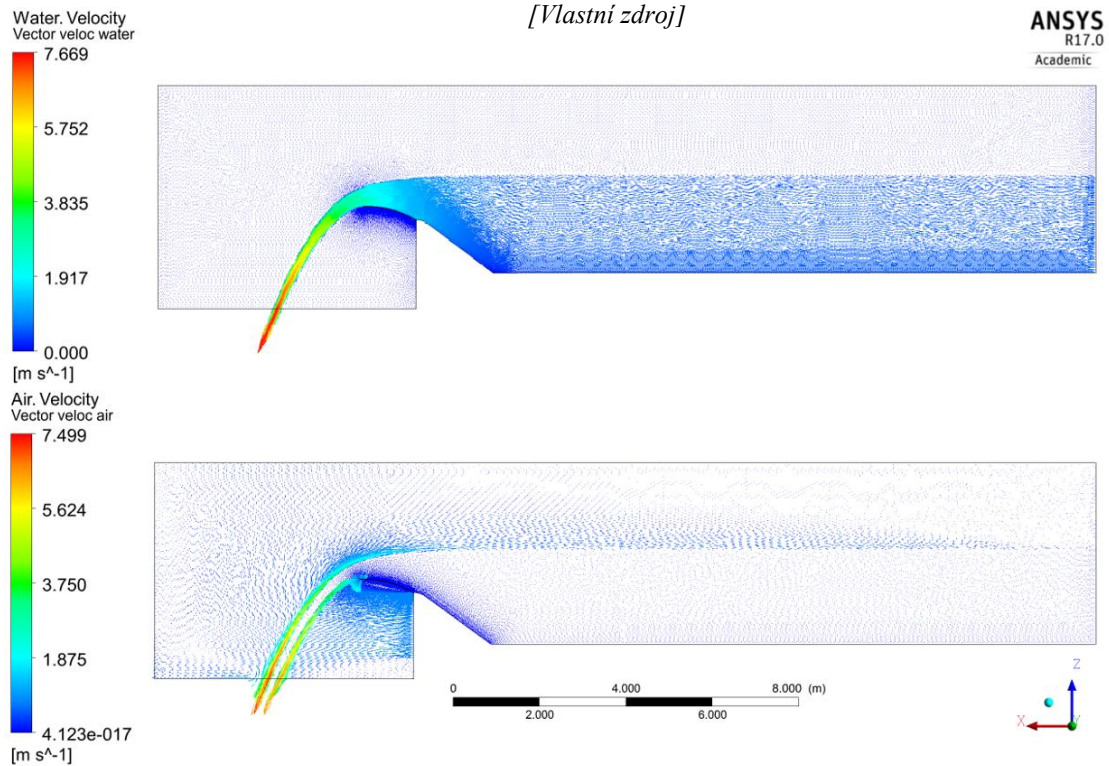
Po výpočtu všech dílčích modelů jsou v komponentním programu *Results* získána vizuální data a číselné hodnoty fyzikálních veličin. Při vizualizaci výsledků lze zobrazit například vektory rychlostí, proudnice, vymezující plochy a objemy, dráhy částic, grafy nebo vykreslení veličin na plochách v barevném rozlišení dle hodnot. Také lze rozšířit modely, které jsou zjednodušeny okrajovou podmínkou Symmetry. Vybrané vizualizace přepadu vody přes zjednodušenou konstrukci klapky, zobrazené na Obr. 4.12 – Vizualizace: Obrys rozdělení objemů tekutin (nahore) a obrys tlaků (dole) až Obr. 4.15 – Vizualizace: Obrys tlaků na rozšířené klapce, jsou pro klapku v Poloze 9 s úhlem sklopení

$\omega = 30,1^\circ$ a výškou hladiny horní vody nad osou otáčení $H = 1$ m a výškou přepadového paprsku $h = 0,7$ m.

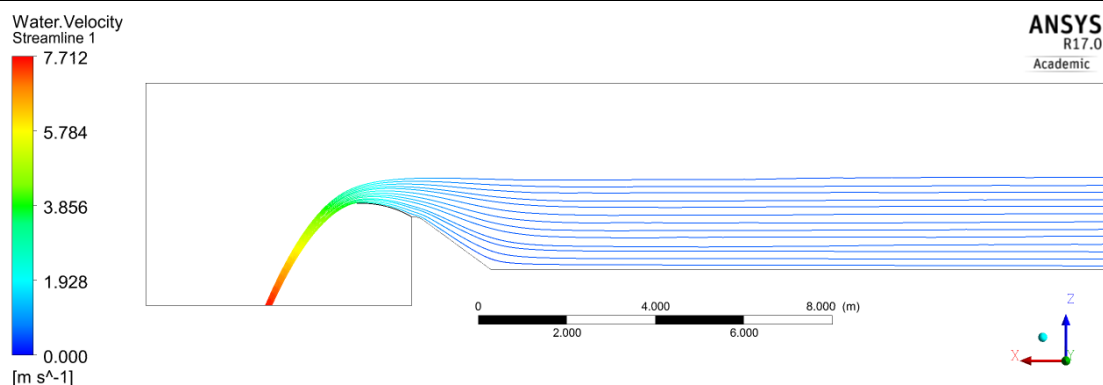


Obr. 4.12 – Vizualizace: Obrys rozdělení objemů tekutin (nahore) a obrys tlaků (dole)

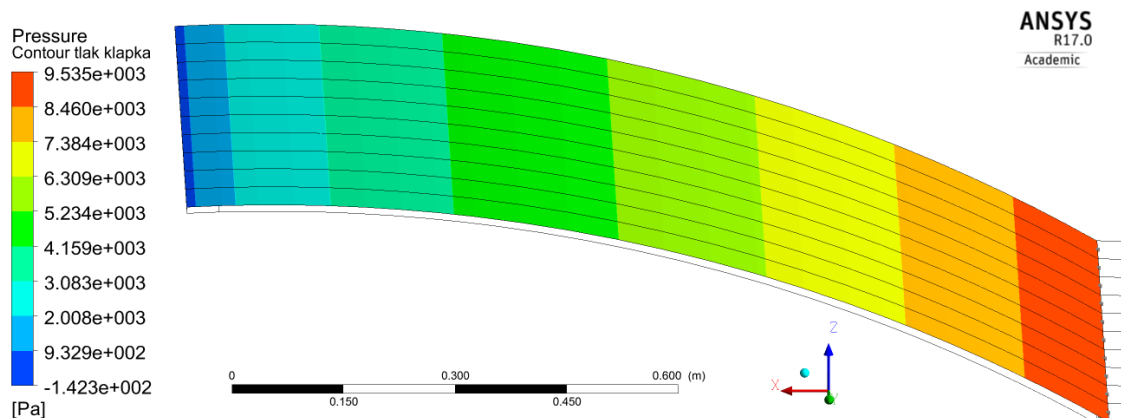
[Vlastní zdroj]



Obr. 4.13 – Vizualizace: Vektory rychlosti proudění vody (nahore) a vektory rychlosti proudění vzduchu (dole) [Vlastní zdroj]



Obr. 4.14 - Vizualizace: Proudnice přepadu [Vlastní zdroj]



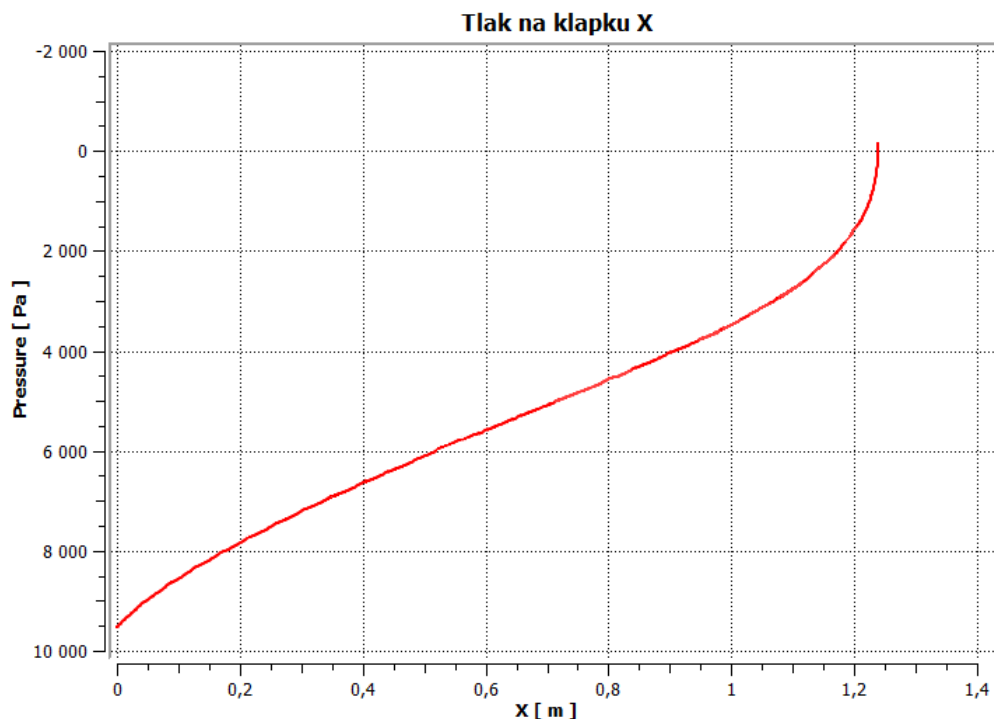
Obr. 4.15 – Vizualizace: Obrys tlaků na rozšířené klapce [Vlastní zdroj]

Pomocí nástroje *Expressions* v komponentním programu *Results* jsou stanoveny pro všechny dílčí modely hodnoty průtoku Q v kg/s na vtoku a výtoku z modelu, hodnoty rychlostí proudění na vtoku a před klapkou, hodnoty složek sil od hydrodynamického zatížení ve směrech F_{hx} a F_{hz} a hodnota sklopného momentu M_h okolo osy otáčení klapky Y . Veškeré zjištěné hodnoty jsou bez vlivu spodní vody a bez vzniklých podtlaků pod přepadovým paprskem. Na Obr. 4.16 – *Vztahy vstupních hodnot* jsou zobrazeny rozepsané vztahy pro zjištění těchto veličin v modelu. Získaná data jsou vyhodnocena a výsledky jsou popsány a zobrazeny v následující kapitole. Jako doplňkové hodnoty jsou určeny tlaky na dně předpolí, max a min hodnota tlaku na klapce, které kontrolují nastavení hladiny vody.

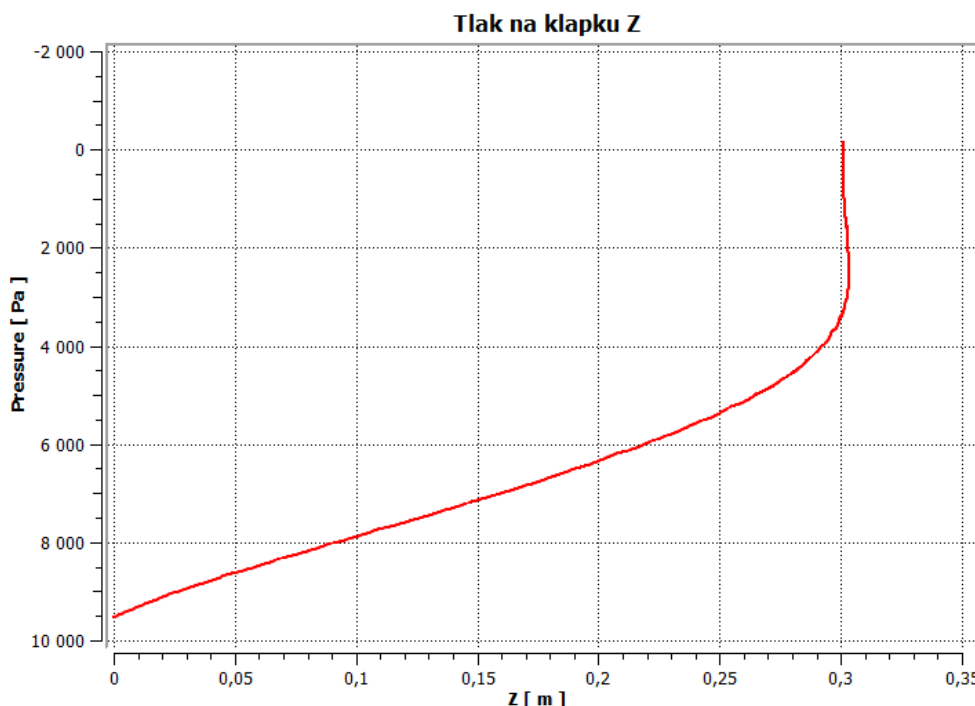
	moment Y	<code>Water.torque_y()@Flap_up</code>
	prutok vtok	<code>Water.massFlow()@Inlet</code>
	prutok vytok	<code>Water.massFlow()@Outlet</code>
	rychlost pred klapkou	<code>maxVal(Water.Velocity u)@Line 1</code>
	rychlost vtok	<code>maxVal(Water.Velocity u)@Line 2</code>
	sila X	<code>force_x()@Flap_up</code>
	sila Z	<code>force_z()@Flap_up</code>
	tlak dno	<code>maxVal(Pressure)@Point 3</code>
	tlak max klapka	<code>maxVal(Pressure)@Point 2</code>
	tlak min klapka	<code>maxVal(Pressure)@Point 1</code>

Obr. 4.16 – Vztahy vstupních hodnot [Vlastní zdroj]

Díky možnosti vykreslit grafy bodových hodnot veličin například na křivce, jsou získány průběhy hydrodynamických tlaků na hradicím plechu klapky ve směrech X a Z ve všech dílčích modelech. Na *Obr. 4.17 – Graf průběhu tlaku na hradicím plechu klapky ve směru X* a *Obr. 4.18 – Graf průběhu tlaku na hradicím plechu klapky ve směru Z* jsou zobrazeny průběhy tlaku na klapce v Poloze 9 s úhlem sklopení $\omega = 30,1^\circ$ a výškou hladiny horní vody nad osou otáčení $H = 1$ m. Ze získaného souboru dat tlaku, v m.v.s. na hradicím plechu, je pro každý dílčí model určeno 30 hodnot tlaků, které jsou rozmístěny v konstantních vzdálenostech po klapce. Hodnoty tlaků v 30 bodech na klapce jsou stanoveny pomocí lineární interpolace v souboru dat hydrodynamických tlaků. Integrací 30 hodnot tlaků po délce klapky jsou stanoveny plochy zatěžovacích obrazců, z nichž jsou stanoveny hodnoty hydrodynamických sil F_h . Dále jsou určeny délky ramen sil r_h , díky kterým jsou stanoveny sklopné momenty M_h . Toto vyhodnocení napodobuje vyhodnocení bodových tlaků v piezometrech získaných při měření prof. Čábelky z roku 1974. Zároveň tento postup stanovení hydrodynamických sil, ramen a momentů slouží ke kontrole hodnot získaných z modelačního programu Ansys. Shodu hodnot hydrodynamických sil z vyhodnocení tlaků na klapce a hodnot získaných z programu lze označit za dobrou. Jejich průměrný rozdíl je 1,57%.



Obr. 4.17 – Graf průběhu tlaku na hradicím plechu klapky ve směru X[Vlastní zdroj]



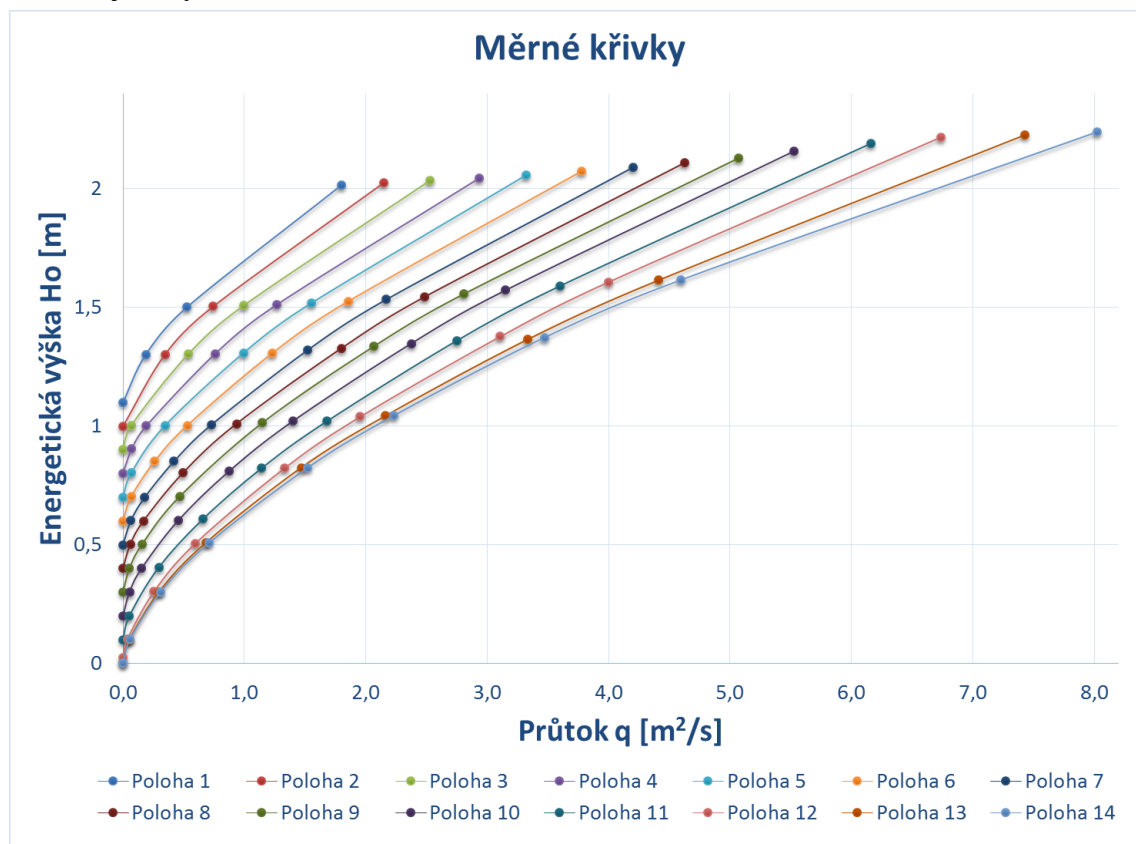
Obr. 4.18 – Graf průběhu tlaku na hradicím plechu klapky ve směru Z [Vlastní zdroj]

4.2.6 Prezentace výsledků

Vyhodnocením dat získaných v komponentním programu *Results* jsme schopni pro všechny dílčí modely určit specifický průtok q , celkovou sílu od hydrodynamického zatížení F_h , sklon hydrodynamické síly získaný ze směrových složek síly F_{hx} a F_{hz} , rameno hydrodynamické síly z osy otáčení r_h , ramena z osy otáčení k složkám síly r_{hx} a r_{hz} , hodnoty hydrodynamického momentu M_h , rychlosti proudění nad klapkou a přepadový součinitel μ . Tabulka s číselnými hodnotami veličin je zobrazena v Příloze H. Veškeré získané veličiny popisují přepad vody přes klapku při plném zavzdušnění prostoru pod klapkou.

Jedním z cílů této diplomové práce je stanovení měrných křivek dutých klapky. Z 88 modelem zjištěných hodnot průtoků vody přes konstrukci duté klapky jsme schopni popsat závislosti specifického průtoky q na výšce hladiny horní vody H , na hodnotě energetické výšky H_0 před klapkou nebo na úhlu sklopení klapky ω . Na Obr. 4.19 – Měrné křivky z dat z modelu jsou zobrazeny měrné křivky závislosti specifického průtoky a energetické výšky před klapkou ve všech 14 polohách sklopení klapky, ze kterých se skládá matematický model. Graf závislosti specifických průtoků na úhlu sklopení klapky ω je zobrazen v Příloze I. Tabulka s číselnými hodnotami specifických průtoků v závislosti na úhlu sklopení klapky ω a neovlivněné výšce hladiny horní vody H před klapkou je zobrazena v Příloze J. Hodnoty specifických průtoků v Příloze J, které nejsou určeny

přímo matematickým modelem, jsou získány interpolací mezi hodnotami specifických průtoků zjištěných z modelu.



Obr. 4.19 – Měrné křivky z dat z modelu[Vlastní zdroj]

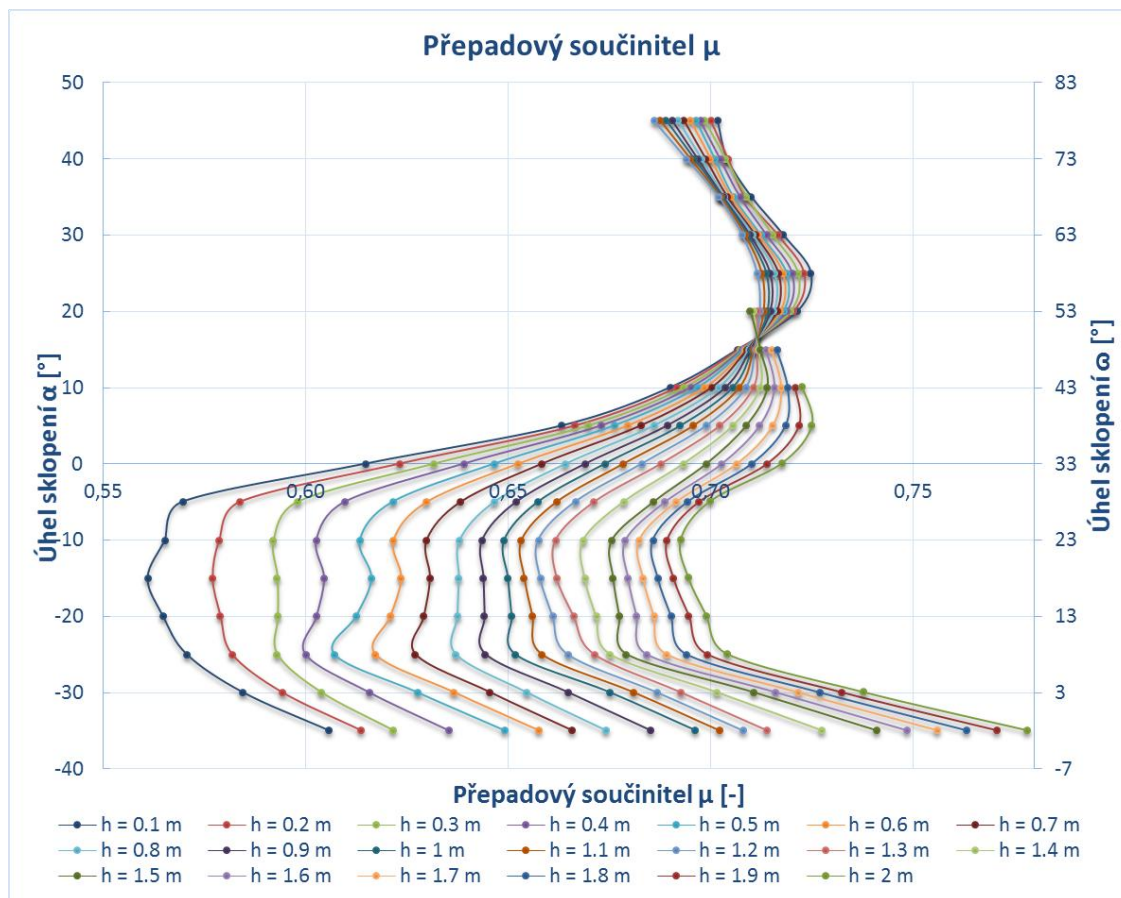
Součástí vyhodnocení je i stanovení hodnot přepadových součinitelů μ pro každý dílčí model z hodnot specifických průtoků q pomocí vzorce (3.3) pro dokonalý nezatopený přepad. Z 88 zjištěných hodnot přepadových součinitelů jsou další hodnoty stanoveny pomocí interpolace. V Příloze K je zobrazena tabulka s číselnými hodnotami zjištěných přepadových součinitelů μ . Na Obr. 4.20 – Přepadový součinitel μ z dat z modelu jsou zobrazeny přepadové součinitele μ v závislosti na úhlu sklopení klapky α (ω) a na výšce přepadového paprsku h padajícího přes klapku. Zobrazení vychází z Obr. 3.8 – Graf závislosti rozšířeného přepadového součinitele, ale opět není uvažována závislost přepadového součinitele na křivosti hradícího plechu, protože křivost hradícího plechu v modelu je konstantní $R=2,25\text{m}$.

Z průběhu přepadového součinitele μ na Obr. 4.20 lze určit čtyři fáze chování přepadového součinitele v závislosti na změně úhlu sklopení klapky α (ω). První fázi lze označit mírný nárůst hodnoty přepadového součinitele při sklápění klapky z plně zdvižené polohy $\alpha = 45^\circ$ až do polohy s úhlem $\alpha = 24^\circ$. V této fázi dochází značnému obtékání

zakřivené plochy hradícího plechu. Při růstu přepadového součinitele v této fázi dochází k výhodnému zvyšování kapacity přelivu. Druhá fáze nastává při dalším sklápění klapky až do polohy $\alpha = -8^\circ$, kdy hodnota přepadového součinitele postupně klesá a zároveň neklesá i kapacita přelivu. V poloze klapky $\alpha = 16^\circ$ nastává chvíle, při které nemá výška přepadového paprsku h vliv na hodnotu přepadového součinitele. Přepadový součinitel je konstanta. Při dalším sklápění z polohy $\alpha = -8^\circ$ až do polohy $\alpha = -25^\circ$ nastává třetí fáze, fáze stagnace hodnoty přepadového součinitele. V této fázi nedochází k nárůstu kapacity při sklopení klapky. Poslední fáze nastává při sklopení klapky do poloh, kdy $\alpha < -25^\circ$. V této fázi dochází k velkému nárůstu hodnoty přepadového součinitele μ a zároveň k nárůstu kapacity přelivu vlivem vzniklých podtlaků a sání na sklopeném hradícím plechu duté klapky. Rozdíl průtoků ve dvou polohách $\alpha = -33^\circ$ a $\alpha = -38^\circ$ při stejných výškách hladin horní vody je v procentech v rozmezí 3-8 %.

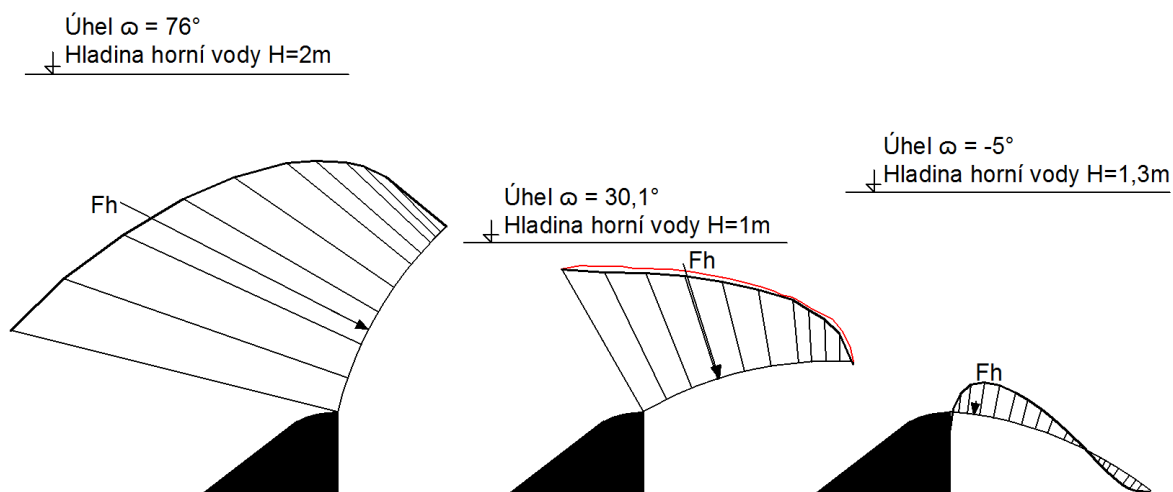
Z grafu přepadového součinitele na Obr. 4.20 je patrné, že předpoklad extrapolace hodnot přepadových součinitelů (zobrazeno na Obr. 4.11) při úhlu sklopení α jiném než je rozsah grafu na Obr. 3.8 byl nesprávný.

Zobrazení 3D grafu zjištěných přepadových součinitelů je v Příloze L.



Obr. 4.20 – Přepadový součinitel μ z dat z modelu[Vlastní zdroj]

Druhým cílem této diplomové práce je stanovit hydrodynamické zatížení na hradící plech duté klapky. Dvojím vyhodnocením matematického modelu jsme získali hodnoty popisující hydrodynamické zatížení včetně průběhů hydrodynamických tlaků na hradícím plechu duté klapky. Na *Obr. 4.21 – Průběhy hydrodynamických tlaků zjištěné matematickým modelem* jsou schématicky zobrazeny zjištěné průběhy hydrodynamického tlaku a velikosti hydrodynamických sil včetně působišť pro tři náhodně vybrané polohy klapky s různou výškou hladiny horní vody H . Schéma nalevo zobrazuje průběh hydrodynamického tlaku na zdvižené klapce při výšce hladiny horní vody $H = 2$ m. Výška přepadového paprsku je v tomto případě rovna $h = 0,9$ m. Prostřední schéma se podmínkami shoduje s Polohou 8 fyzikálního modelu prof. Čábelky z roku 1974, zobrazenou na *Obr. 3.11 – Průběhy hydrodynamických tlaků zjištěných fyzikálním výzkumem*. Červeně je vyznačen průběh hydrodynamického tlaku zjištěný prof. Čábelkou a černě je vyznačen průběh hydrodynamického tlaku zjištěný matematickým modelem. Na *Obr. 4.21* je patrná shoda průběhů hydrodynamického tlaku. Vpravo je schéma průběhu hydrodynamického tlaku na sklopené klapce při výšce hladiny horní vody $H = 1,3$ m. Výška přepadového paprsku je v tomto případě také $h = 1,3$ m. Hradící plech klapky se v této poloze svým obrysem v příčném řezu přibližuje tvaru proudnicové přelivné plochy. Na schématu je vidět vznik podtlaku na konci přelivné plochy klapky, který je způsoben energií přepadového paprsku vedeného po přelivné ploše. Přepadový paprsek má tendence se odtrhnout od hradícího plechu klapky.



Obr. 4.21 – Průběhy hydrodynamických tlaků zjištěné matematickým modelem [Vlastní zdroj]

Pro ucelenější a přehlednější zobrazení veličin hydrodynamického zatížení získaného matematickým modelem je dopočítáno zatížení hydrostatické ve všech 14

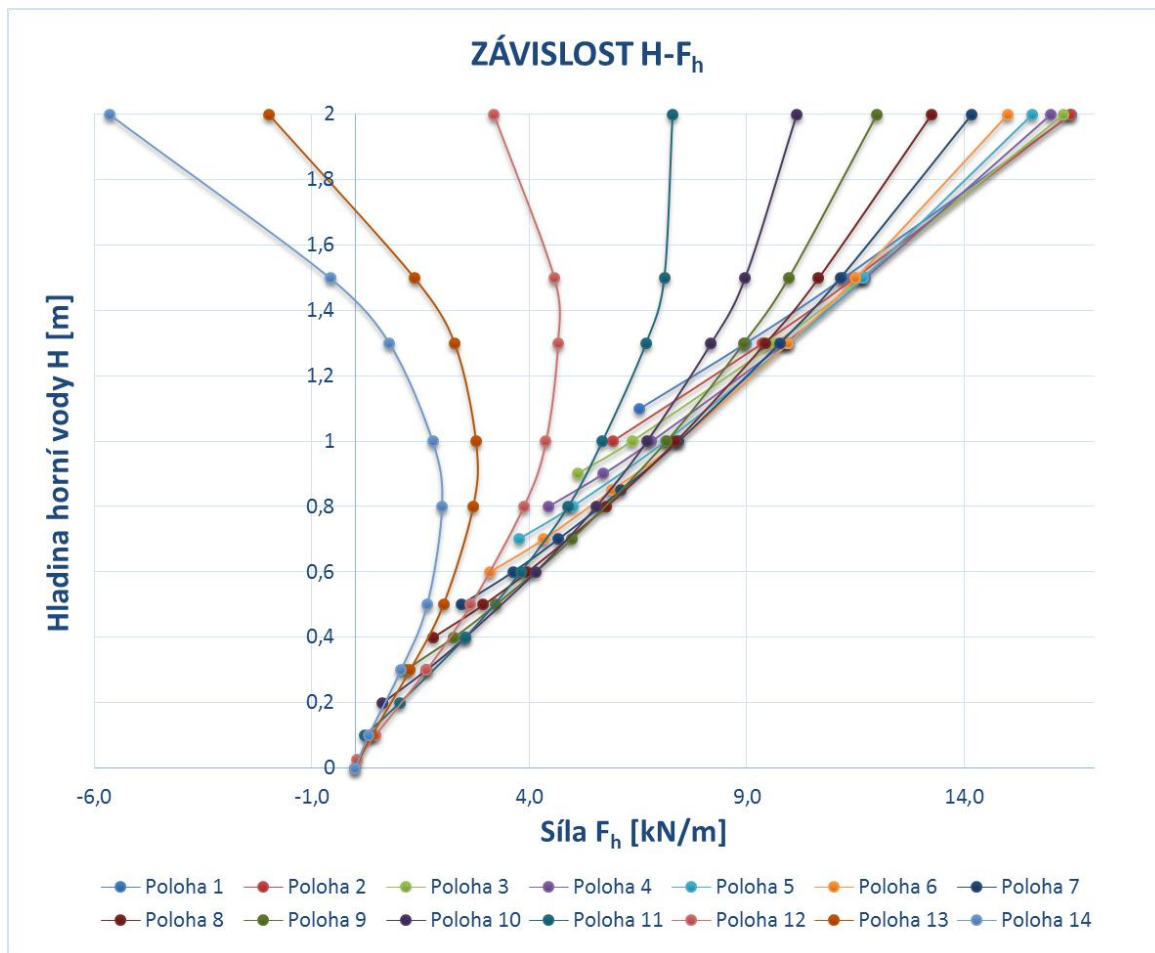
polohách s úrovní hladiny horní vody ve výšce vrcholového bodu na klapce. Pomocí vzorců (3.13), (3.14) a (3.17) jsou stanoveny hodnoty hydrostatických sil F_h , ramen k ose otáčení klapky r_h a hydrostatických momentů M_h . V *Tab. 4.3 – Hodnoty hydrostatického zatížení* jsou zobrazeny vypočítané hydrostatické veličiny. Hodnoty hydrostatického zatížení jsou v grafickém zobrazení hydrodynamických sil, ramen hydrodynamických sil k ose otáčení a hydrodynamických momentů chápány jako hodnoty počátečního zatížení.

Hydrostatické zatížení							
	Síla F_{hx} [kN/m]	Síla F_{hz} [kN/m]	Síla F_h [kN/m]	Rameno r_h [m]	Rameno r_{hx} [m]	Rameno r_{hz} [m]	Moment M_h [kNm/m]
Poloha 1	5,935	2,711	6,525	0,413	0,392	0,137	2,695
Poloha 2	4,905	3,109	5,807	0,409	0,366	0,187	2,375
Poloha 3	3,973	3,216	5,111	0,403	0,336	0,225	2,058
Poloha 4	3,139	3,124	4,428	0,396	0,306	0,255	1,755
Poloha 5	2,403	2,887	3,757	0,390	0,275	0,278	1,463
Poloha 6	1,766	2,542	3,095	0,382	0,245	0,295	1,182
Poloha 7	1,226	2,105	2,436	0,365	0,209	0,300	0,888
Poloha 8	0,785	1,604	1,786	0,340	0,172	0,294	0,606
Poloha 9	0,441	1,062	1,150	0,285	0,126	0,256	0,328
Poloha 10	0,196	0,593	0,624	0,234	0,085	0,218	0,146
Poloha 11	0,049	0,213	0,218	0,161	0,042	0,156	0,035
Poloha 12	0,003	0,027	0,028	0,085	0,011	0,084	0,002
Poloha 13	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Poloha 14	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tab. 4.3 – Hodnoty hydrostatického zatížení [Vlastní zdroj]

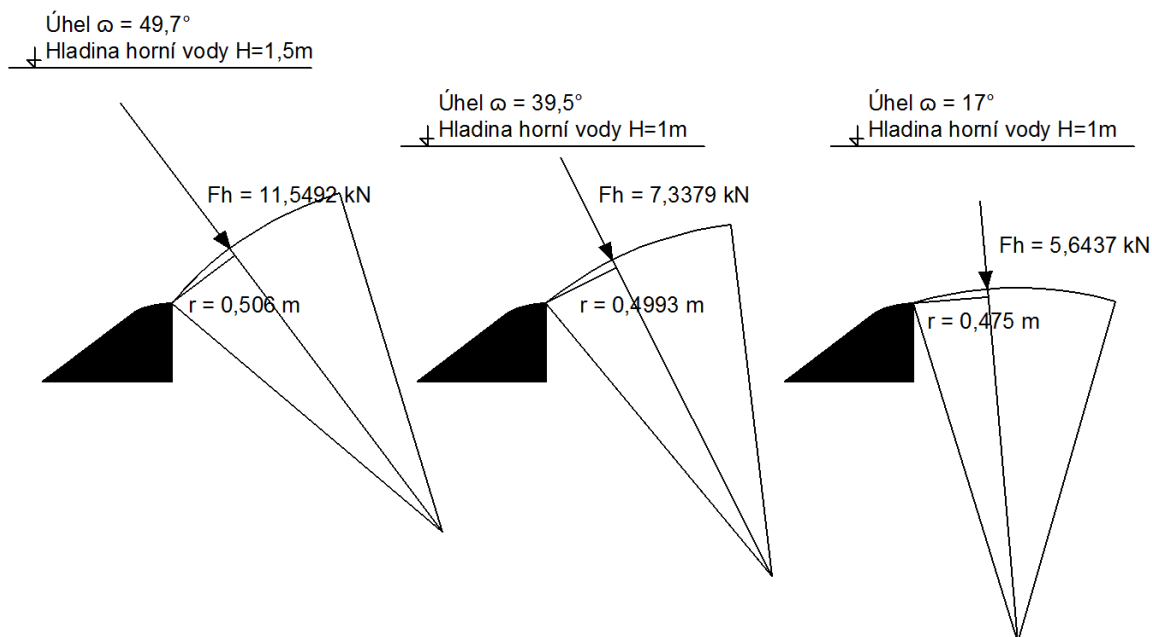
Voda proudící okolo klapky na ni vyvozuje tlakové zatížení, které lze zjednodušeně popsat silou F_h a bodem jejího působíště. Na *Obr. 4.22 – Hydrodynamické síly* jsou zobrazeny změny těchto sil v závislosti na růstu hladiny horní vody při různých polohách sklopení klapky. Z *Obr. 4.22* je patrné, že v Polohách 1 až 11 dochází k nárůstu hydrodynamického zatížení při zvyšování úrovně hladiny horní vody. V Polohách 12 až 14, kdy je klapka ve sklopené a přibližuje se tvaru proudnicové přelivné plochy, vznikají při vyšších přepadových paprscích na klapce podtlaky vyvolané energií přepadového paprsku. Síly vyvozené podtlaky mají opačný směr oproti silám vyvozených hydrodynamickými tlaky. Při zvyšování úrovně hladiny horní vody ve sklopených polohách 12 až 14 dochází nejprve k růstu zatížení hydrodynamickými tlaky a ke zvyšování hodnoty hydrodynamických sil. Při dostatečném nárůstu výšky hladiny horní vody začínají na klapce převládat podtlaky s opačným směrem působení, které ovlivňují hodnotu hydrodynamické síly. Hodnota hydrodynamických sil postupně přechází až do záporu.

V Příloze M jsou zobrazeny grafy složek hydrodynamické síly F_h ve směrech X a Z v závislosti na úrovni hladiny horní vody. Znaménko hodnot složek je stanoveno dle zvolené soustavy souřadnic v modelu. Zobrazené na Obr. 4.4 – Počátek soustavy souřadnic.



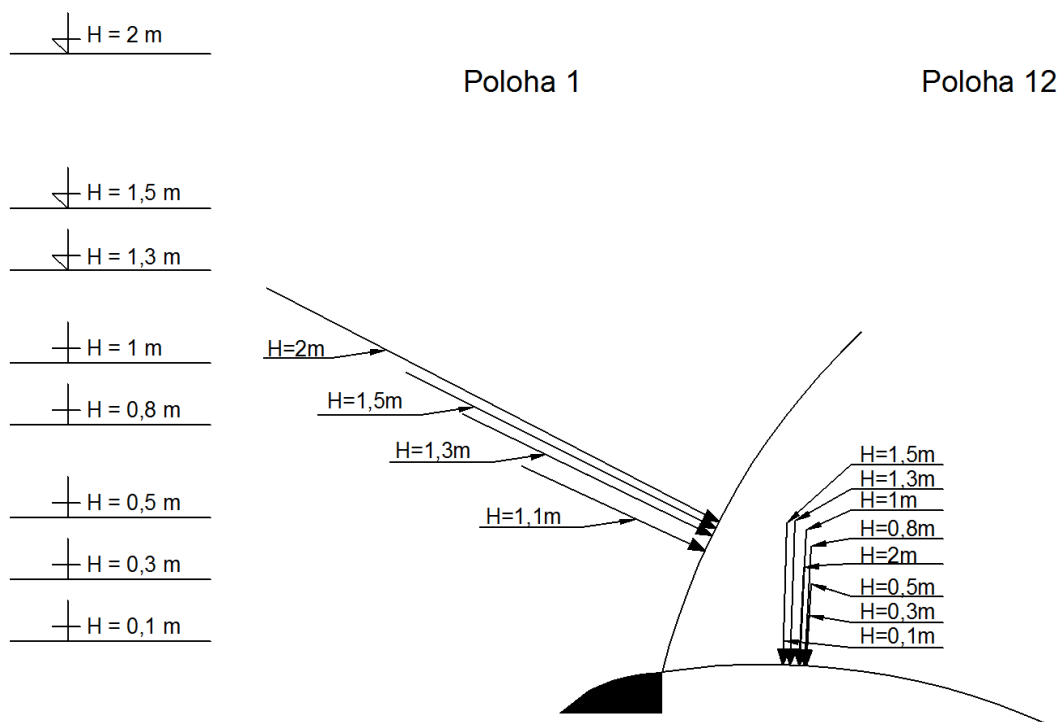
Obr. 4.22 – Hydrodynamické síly[Vlastní zdroj]

Na Obr. 4.23 – Schéma působení hydrodynamické síly jsou ve třech náhodně zvolených polohách klapky s různou výškou hladiny horní vody H pro kontrolu vykresleny velikosti hydrodynamických sil F_h ve zvoleném měřítku v bodu působišť a délky ramen r_h síly k ose otáčení klapky. Sklon sil je stanoven ze směrových složek F_{hx} a F_{hz} . Síly od hydrodynamického zatížení směřují do středu křivosti hradícího plechu.



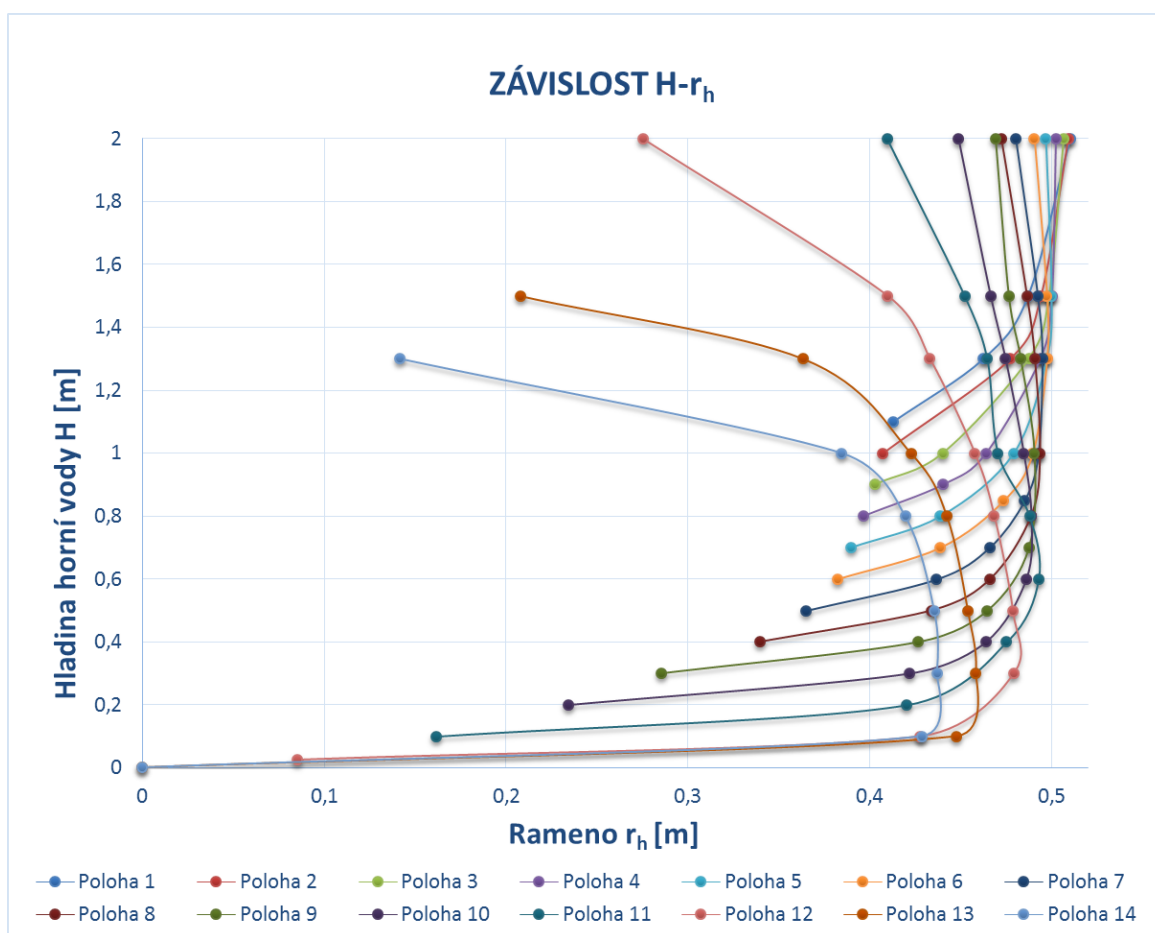
Obr. 4.23 – Schéma působení hydrodynamické síly[Vlastní zdroj]

Na Obr. 4.24 – Působíště hydrodynamických sil jsou ve dvou náhodně zvolených polohách klapky ve svých působíštích zobrazeny velikosti hydrodynamických sil ve zvoleném měřítku. Na Obr. 4.24 lze spatřit posun působíště hydrodynamické síly po konstrukci duté klapky při nárůstu hladiny horní vody a nárůst hodnoty hydrodynamické síly.



Obr. 4.24 – Působíště hydrodynamických sil[Vlastní zdroj]

Hydrodynamické síly zatěžují konstrukci klapky a snaží se jí pootočit v bodě otáčení. Místo působení hydrodynamické síly F_h vychází z pomyslného těžiště zatížení od hydrodynamického tlaku. Při známém místě působení síly lze jednoduše stanovit rameno síly r_h k ose otáčení klapky. Na *Obr. 4.25 – Ramena hydrodynamických sil* jsou zobrazeny hodnoty délek ramen hydrodynamických sil k ose otáčení klapky v závislosti na úrovni hladiny horní vody ve 14 modelovaných polohách klapky. Z Grafu na *Obr. 4.25* lze vyčíst, že u Poloh klapky 1 až 10 dochází k nárůstu délky ramene při nárůstu výšky hladiny horní vody až do bodu, kdy je výška přepadového paprsku $h = 0,4$ m. Při dalším navyšování hladiny horní vody se délka ramen příliš nemění a jejich hodnota se pohybuje v rozmezí 0,45 – 0,5 m. Pomyslné těžiště zatížení od hydrodynamického tlaku, které určuje působíště síly, se při nárůstu výšky hladiny příliš neposouvá. U poloh klapky 11 až 14 je závislost délek ramen na výšce hladiny horní vody téměř totožná, ovšem při vyšších přepadových paprscích dochází ke snižování délky ramen. Působíště hydrodynamické síly se posouvá blíže k ose otáčení vlivem vzniku podtlaků na konci přelivné plochy klapky.



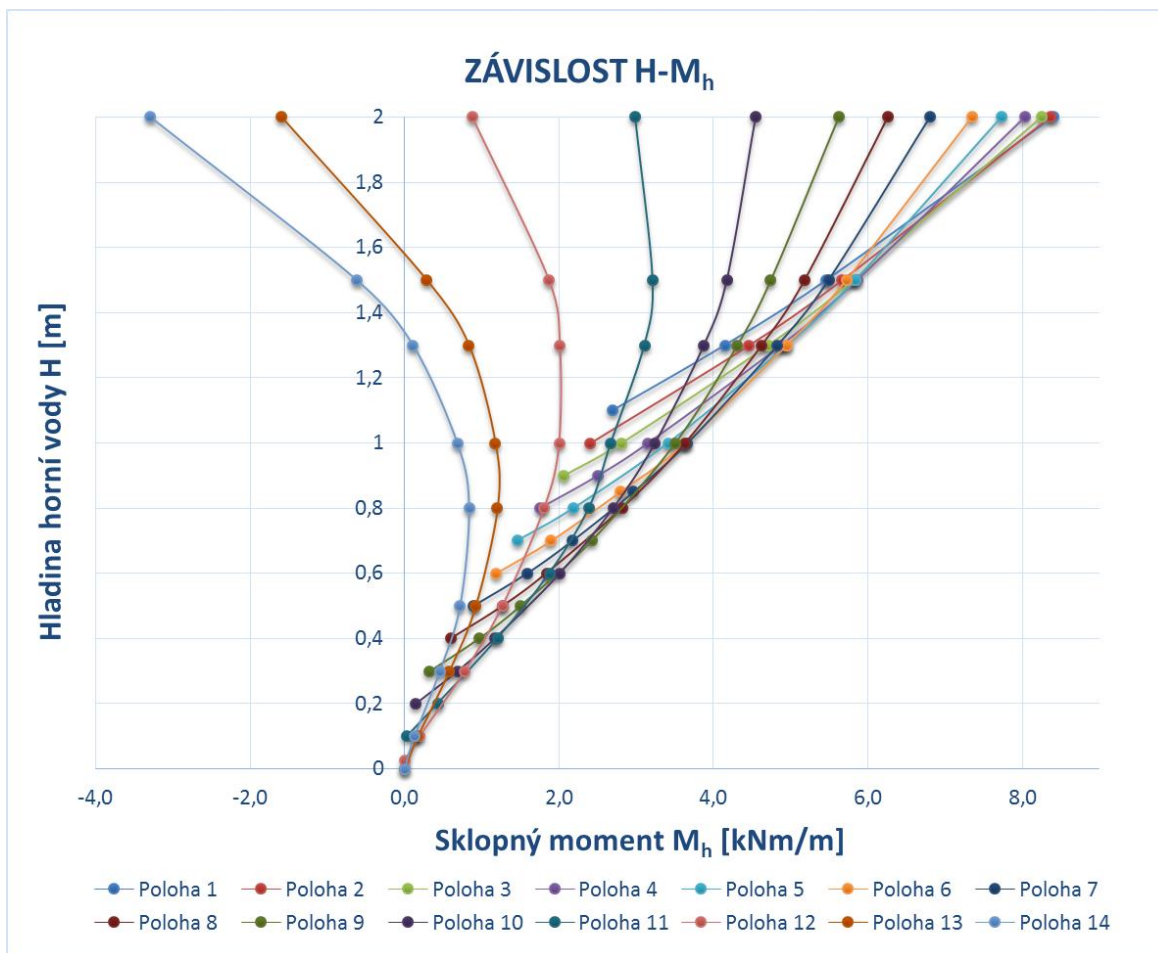
Obr. 4.25 – Ramena hydrodynamických sil[Vlastní zdroj]

V Grafu na *Obr. 4.25* nejsou zobrazeny hodnoty délek ramen záporných hydrodynamických sil, protože stanovení působíště síly při převaze podtlaků na klapce je nepřesné. 3D zobrazení závislosti délek ramen na úhlu sklopení ω a výšce hladiny horní vody je v Příloze O. Grafy ramen složek hydrodynamických sil ve směrech X a Z jsou zobrazeny v Příloze N. V grafech v příloze N také nejsou zobrazeny hodnoty ramen hydrodynamických sil při působení podtlaků.

Hydrodynamická síla, která působí na klapku a snaží ji pootočit v bodě otáčení, vyvozuje na konstrukci zatížení hydrodynamickým momentem M_h . Hodnotu hydrodynamického momentu lze jednoduše stanovit pomocí hodnoty hydrodynamické síly a délky ramene k ose otáčení klapky pomocí vzorce (3.17). Na *Obr. 4.26 – Hydrodynamické momenty* jsou zobrazeny změny sklopného momentu od hydrodynamického zatížení při zvyšování úrovně hladiny horní vody ve všech modelovaných 14 polohách klapky. Stejně jako v případě průběhu hydrodynamických sil F_h zobrazených na *Obr. 4.22* dochází v Polohách 1 až 11 k nárůstu momentu od hydrodynamického zatížení při zvyšování úrovně hladiny horní vody. V Polohách 12 až 14, kdy vznikají při přepadu vody na hradícím plechu klapky podtlaky, vyvozují hydrodynamické síly s opačným znaménkem záporné momenty. Momenty s kladným znaménkem se snaží klapku sklopit a namáhají podpěrné pohybovací mechanismy tlakem. Momenty se záporným znaménkem otáčí klapku do vztyčené polohy a namáhají podpěrné pohybovací mechanismy klapky tahem. Změna směru otáčení momentu tedy způsobuje změnu napětí v podpěrných hydromotorech, jenž je při návrhu pohybovacího mechanismu nechtěná a nadbytečně komplikující. Zároveň při časté změně typu napětí dochází k rychlejšímu opotřebení mechanismů.

Zatížení od hydrodynamického momentu je jen jedním z řady zatížení působících na konstrukci klapky. Například moment vyvozený vlastní tíhou konstrukce se snaží výhodně sklopit klapku. Důležité tedy je, v jakém směru působí celkové sklopné momenty při provozu jezu s dutou klapkou.

3D graf momentu M_h je zobrazen v Příloze Q. Graf závislosti hydrodynamického momentu na úhlu sklopení klapky ω je umístěn v Příloze P. Hodnoty hydrodynamických momentů v Příloze P, které nejsou určeny přímo matematickým modelem, jsou také získány interpolací mezi hodnotami momentů zjištěných z modelu.



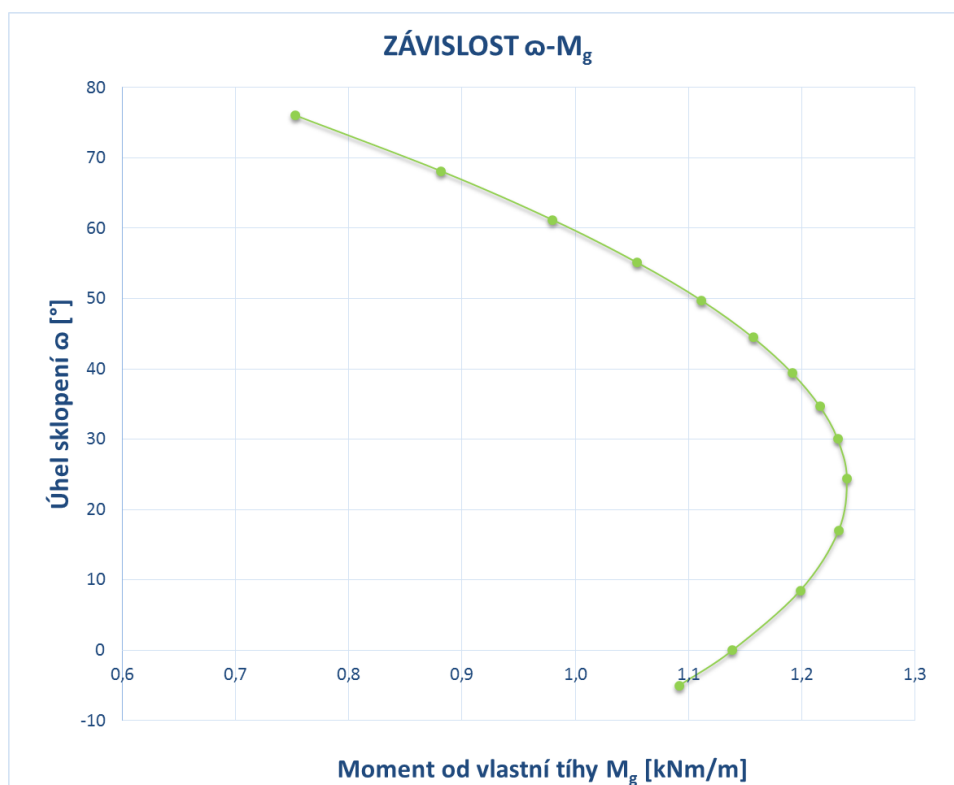
Obr. 4.26 – Hydrodynamické momenty[Vlastní zdroj]

Pro popsání vlivu druhého největší zatížení konstrukce klapky na změnu směru otáčení celkových sklopných momentů je stanoveno zatížení od vlastní tíhy konstrukce klapky. Jsou dopočítány zatěžující síly F_g , ramena k ose otáčení klapky r_g a sklopné momenty M_g od vlastní tíhy klapky pomocí vzorců (3.17) a (3.23). Zjištěné hodnoty jsou uvedeny v Tab. 4.4 – *Hodnoty zatížení od vlastní tíhy*. Váha je stanovena na metr běžný konstrukce klapky při úvaze tloušťky hradícího a výztužného plechu 8 mm, s jednou podélnou výztuhou T 60 a diafragmami o tloušťce 15 mm ve vzdálenostech 2 metry od sebe. Určením těžiště konstrukce duté klapky je umožněno stanovení délek ramen r_g , které jsou stanoveny v programu AutoCAD.

Na Obr. 4.27 – *Moment od vlastní tíhy konstrukce klapky* je zobrazen průběh momentu od vlastní tíhy M_g v závislosti na úhlu sklopení konstrukce klapky ω .

Zatížení od vlastní tíhy konstrukce				
	Rameno r_{gx} [m]	Váha m [kg/m]	Síla F_g [kN/m]	Moment M_g [kNm/m]
Poloha 1	0,390	197	1,93	0,753
Poloha 2	0,457	197	1,93	0,882
Poloha 3	0,508	197	1,93	0,980
Poloha 4	0,546	197	1,93	1,055
Poloha 5	0,576	197	1,93	1,112
Poloha 6	0,599	197	1,93	1,157
Poloha 7	0,617	197	1,93	1,191
Poloha 8	0,630	197	1,93	1,216
Poloha 9	0,638	197	1,93	1,232
Poloha 10	0,642	197	1,93	1,240
Poloha 11	0,639	197	1,93	1,233
Poloha 12	0,621	197	1,93	1,199
Poloha 13	0,590	197	1,93	1,139
Poloha 14	0,565	197	1,93	1,092

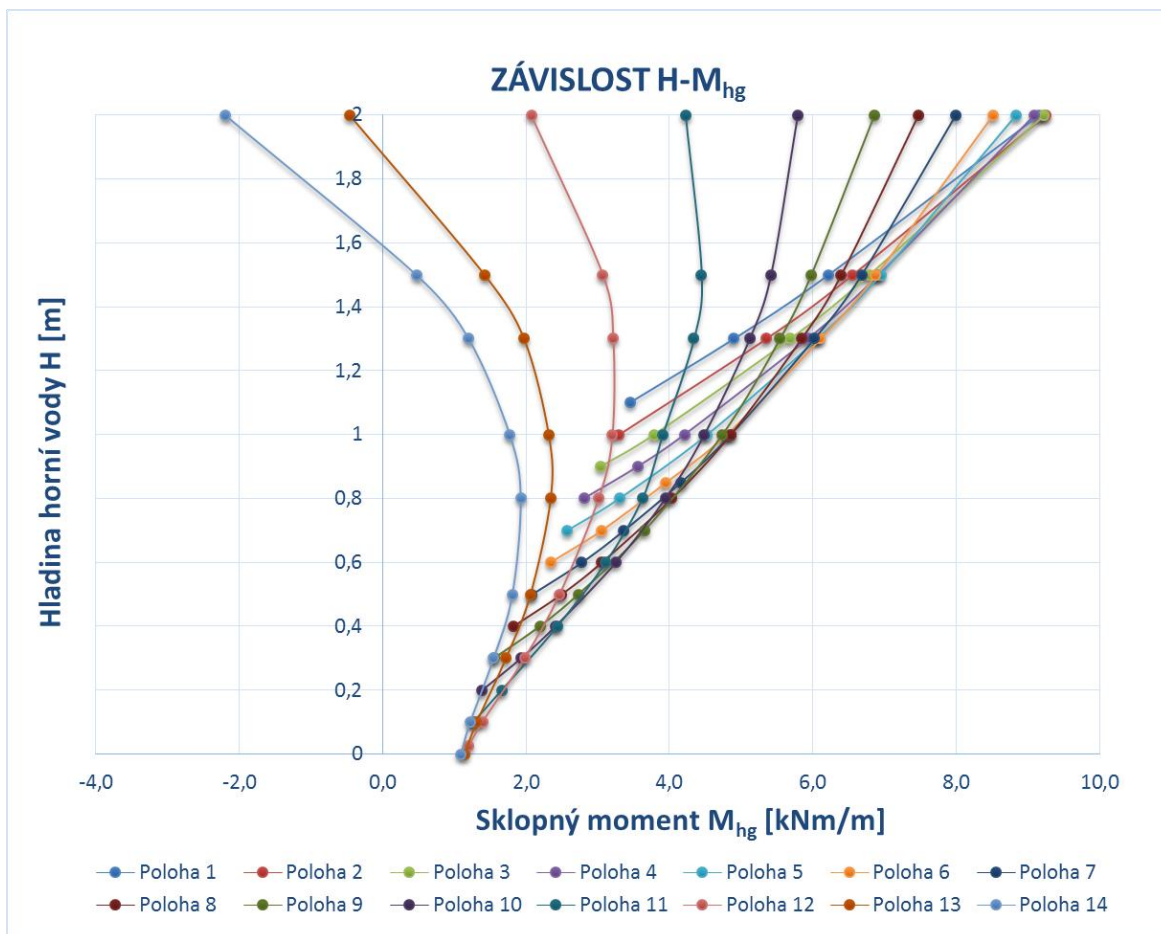
Tab. 4.4 – Hodnoty zatížení od vlastní tíhy[Vlastní zdroj]



Obr. 4.27 – Moment od vlastní tíhy konstrukce klapky [Vlastní zdroj]

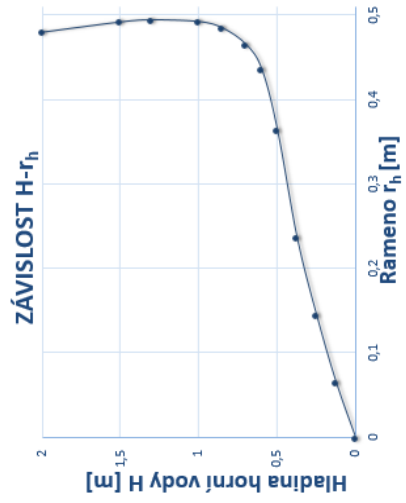
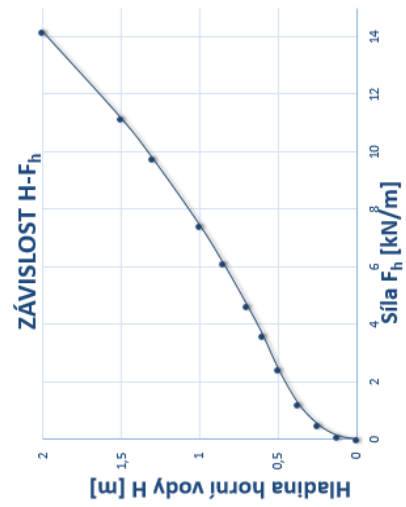
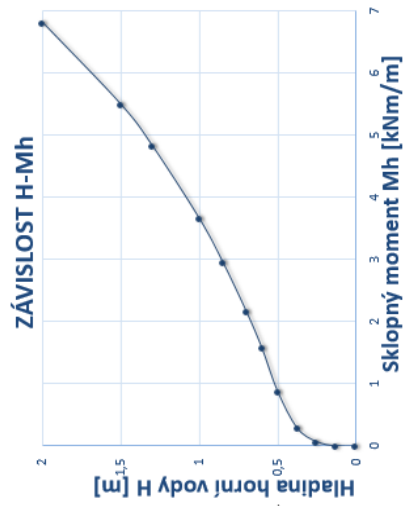
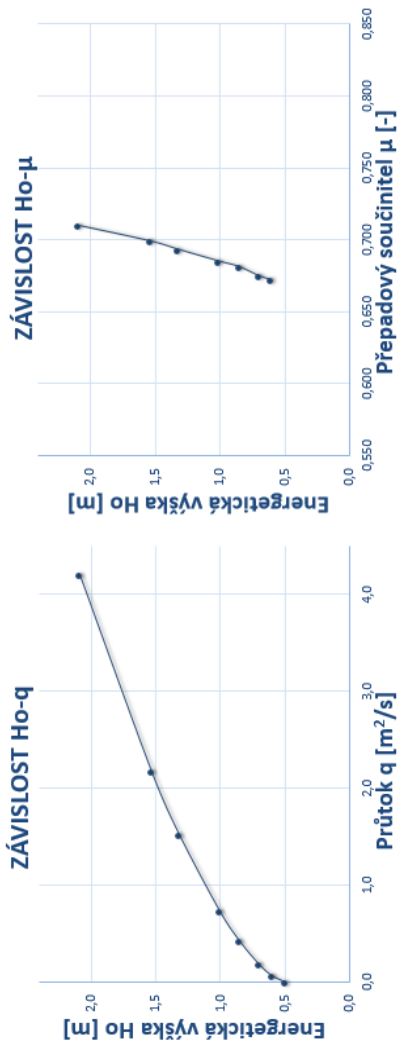
Přičtením hodnoty momentu, vyvozeného vlastní tíhou konstrukce, k hodnotě momentu od hydrodynamického zatížení jsou získána data zobrazena v grafu na Obr. 4.28 – Moment od hydrodynamického zatížení a od vlastní tíhy konstrukce. Z grafu je patrné, že moment od vlastní tíhy konstrukce zvýšil hodnoty záporných hydrodynamických momentů

ve sklopených polohách klapky při velkých přepadových paprscích. Při návrhu robustnější konstrukce sice lze získat výhodnější hodnoty sklopných momentů s kladným směrem otáčení, ovšem náklady na vytvoření a provozování takové konstrukce jsou vyšší.



Obr. 4.28 – Moment od hydrodynamického zatížení a od vlastní tíhy konstrukce [Vlastní zdroj]

Na následující stránce je umístěn souhrn hlavních zjištěných veličin v grafickém zpracování pro Polohu 7 matematického modelu. Na Obr. 4.29 – Grafické shrnutí zjištěných veličin pro polohu 7 je zobrazeno 5 grafů závislosti specifického průtoku a přepadového součinitele na energetické výšce před klapkou a hydrodynamický moment, síla a rameno v závislosti na výšce hladiny horní vody. Pro tuto polohu je dopočítáno pomocí vzorců (3.13), (3.14) a (3.17) hydrostatické zatížení až do stavu, při němž na klapku zatížení od vody nepůsobí. V Příloze R je toto grafické shrnutí provedeno pro všech 14 poloh klapky matematického modelu.



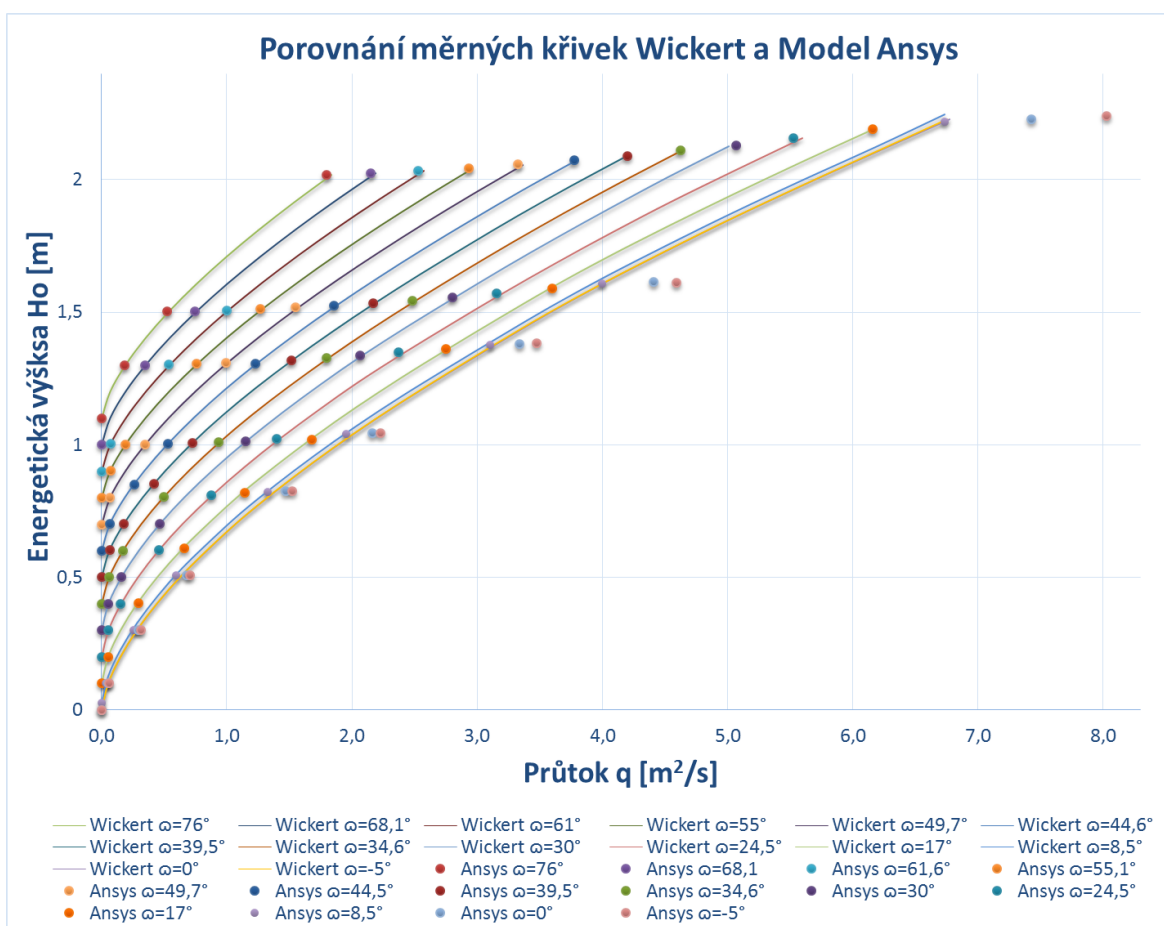
Obr. 4.29 – Grafické shrnutí zjištěných veličin pro polohu 7 [Vlastní zdroj]

5 ANALÝZA VÝSLEDKŮ

5.1 Porovnání s empirickými výpočty

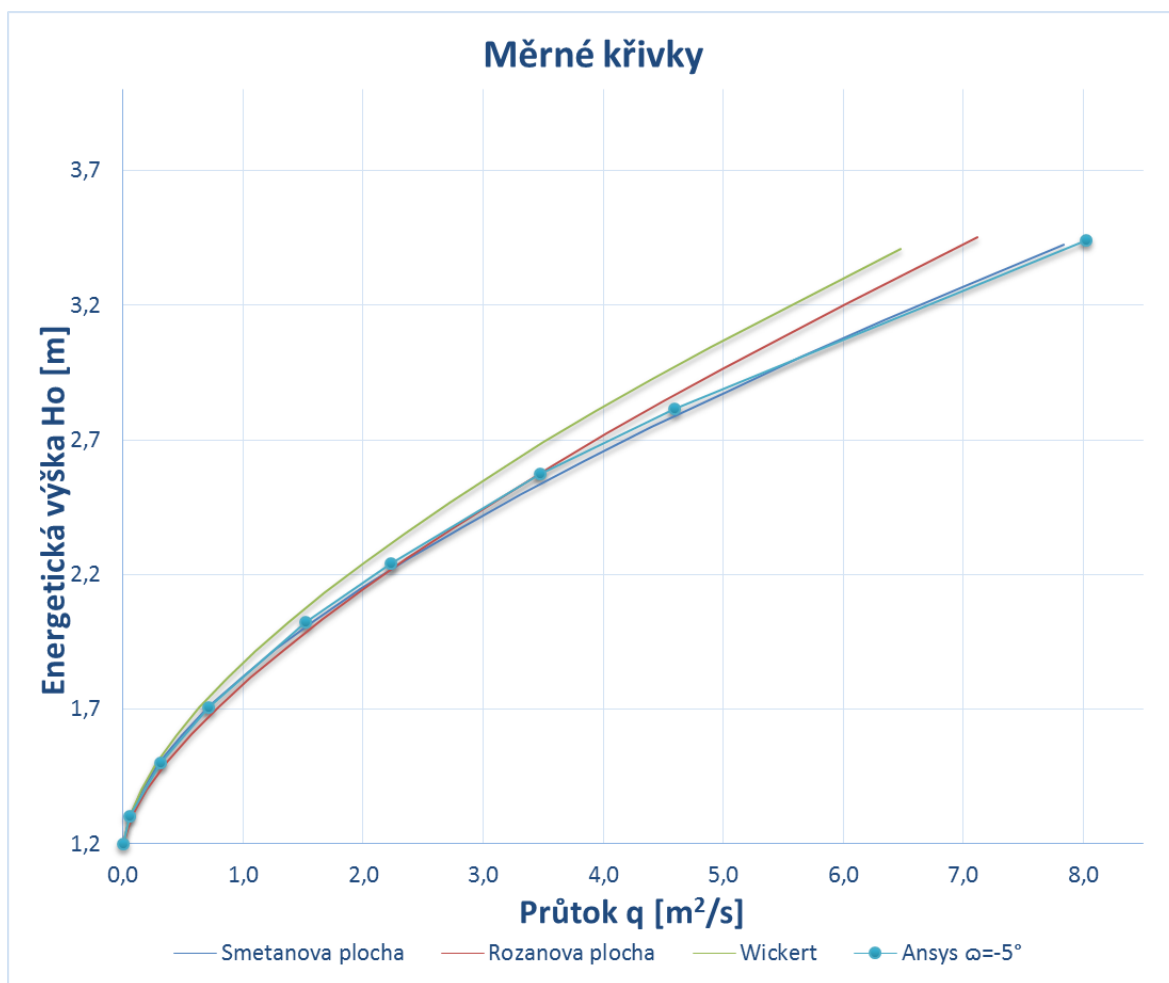
Po získání vyhodnocených dat z matematického modelu je nutné zhodnotit, zda použitá zjednodušení nastavení modelu nemají vliv na data. Jednou z možností analýzy dat z matematického modelu je porovnání s veličinami vypočítanými pomocí empirických vztahů, uvedených v kapitole 3.2. Veškeré kontrolní výpočty jsou provedeny na konstrukci duté klapky typizovaného tvaru. Poloměr zakřivení hradícího plechu R , návrhový úhel vztyčení klapky ω i hrazená výška H se shodují s parametry konstrukce duté klapky použité v matematickém modelu. Úhel ω označuje úhel vodorovné přímky a tečny k zaoblené hradící stěně v místě jejího napojení na spodní stavbu. Úhel α je definován jako úhel mezi vodorovnou přímkou a tečnou k vrchu zaoblené hradící stěny. Úhel α se při použití klapky s návrhovým úhlem sklopení $\omega = 68,1^\circ$ rovná $\alpha = \omega - 33,1^\circ$. Hodnoty specifického průtoku zobrazené na *Obr. 5.1 – Porovnání měrných křivek* jsou stanoveny pomocí vzorců popsáných v kapitole 3.2. Přepad přes klapku je uvažován bez bočních kontrakcí a bez ovlivnění hladinou spodní vody. Pro kontrolní výpočty jsou hodnoty přepadového součinitele μ při neměnné křivosti klapky $R = 2,25\text{m}$ odečteny z *Obr. 4.11 – Extrapolovaný graf pro přepadový součinitel*, který vychází z grafu na *Obr. 3.8 – Graf závislosti rozšířeného přepadového součinitele* při použití vzorce (3.12). Hodnoty přepadového součinitele μ , které jsou odečteny z grafu, již nejsou upravovány dle vzorce (3.11), který je uveden v české literatuře [6]. Hodnota přepadového součinitele μ není určována ve vztahu k návrhové výšce přepadového paprsku. Hodnoty specifických průtoků vypočteny tímto způsobem, zobrazeny na *Obr. 5.1* jsou označeny jako „Wickert“.

Na *Obr. 5.1* lze spatřit shodu mezi specifickými průtoky zjištěnými vyhodnocením matematického modelu a určenými pomocí empirických vztahů ve všech 14 polohách klapky. Pro zkrácení názvů křivek jsou polohy klapky popsány pomocí úhlu sklopení klapky ω . Shodu mezi specifickými průtoky lze v polohách 1-12 označit za velmi dobrou. V posledních dvou sklopených polohách klapky se od sebe hodnoty specifických průtoků liší z důvodu špatného předpokladu extrapolace přepadového součinitele μ ve sklopených polohách, zobrazeno na *Obr. 4.11 – Extrapolovaný graf pro přepadový součinitel*.



Obr. 5.1 – Porovnání měrných křivek [Vlastní zdroj]

Dutá klapka se ve sklopených polohách svým tvarem v příčném řezu přibližuje tvaru proudnicové přelivné plochy. Na proudnicové přelivné ploše se při vyšších přepadových paprscích tvoří podtlaky, které zvyšují kapacitu přelivu. Na sklopené klapce se také tvoří podtlaky. Velikost vzniklých podtlaků na přelivné ploše ovlivňuje specifický průtok přes konstrukci klapky. Na Obr. 5.2 – Porovnání s proudnicovými přelivnými plochami jsou zobrazeny měrné křivky určené pomocí empirických vzorců pro přelivnou plochu dle Smetany (zobrazeno tmavě modrou křivkou), pro přelivnou plochu dle Rozanova (zobrazeno červenou křivkou) a pro dokonalý přepad přes dutou klapku dle Wickertova postupu (zobrazeno zelenou křivkou). Pro určení průtoku přes proudnicovou přelivnou plochu dle Smetany jsou použity vzorce (3.3), (3.7), (3.8) a (3.10) při úvaze výšky pevného přelivu 1,2 m. Na Obr. 5.2 je také zobrazena měrná křivka přes klapku s úhlem sklopení $\omega = -5^\circ$ z průtoků zjištěných matematickým modelem (zobrazena světle modrou křivkou). Z grafu je patrné, že průtok přes sklopenou klapku je téměř shodný s průtokem přes přeliv o stejné výšce s proudnicovou přelivnou plochou dle Smetany. Podtlaky na proudnicové přelivné ploše a na sklopené klapce lze považovat za shodné.



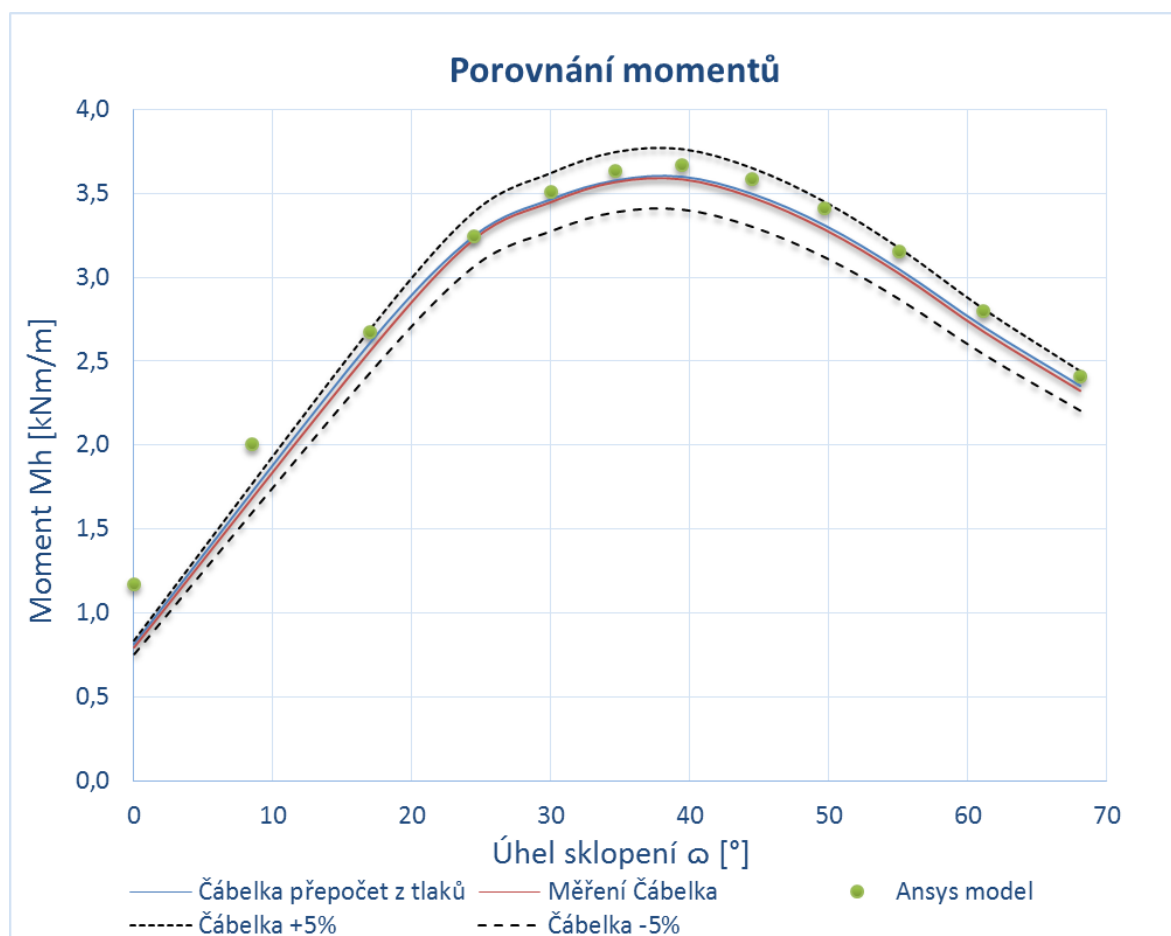
Obr. 5.2 – Porovnání s proudnicovými přelivnými plochami [Vlastní zdroj]

5.2 Srovnání s Čábelkovým pokusem

Druhým způsobem analýzy dat z matematického modelu je porovnání s daty získanými měření na fyzikálním modelu při stejných podmínkách, jaké jsou nastaveny v matematickém modelu. Matematický model je vytvořen tak, aby se část dílčích modelů svými podmínkami shodovala s podmínkami, při kterých byly na fyzikálním modelu provedeném v roce 1974 pod vedením prof. Čábelky zjištěny hodnoty hydrodynamických momentů. Hodnoty momentů byly stanoveny z hodnot tlaků v piezometrech na hradicím plechu modelu duté klapky při udržování stále úrovně horní hladiny vody ve výšce jeden metr nad osou otáčení při postupném sklápění klapky. Toto zatížení popisuje zatížení pouze z návodní strany. Provedení a podmínky fyzikálního modelu prof. Čábelky jsou popsány v kapitole číslo 3.4.2.

Na Obr. 5.3 – Porovnání hydrodynamických momentů je červenou křivkou značen průběh hydrodynamických momentů z měření prof. Čábelky, uváděný v literatuře. Modrou

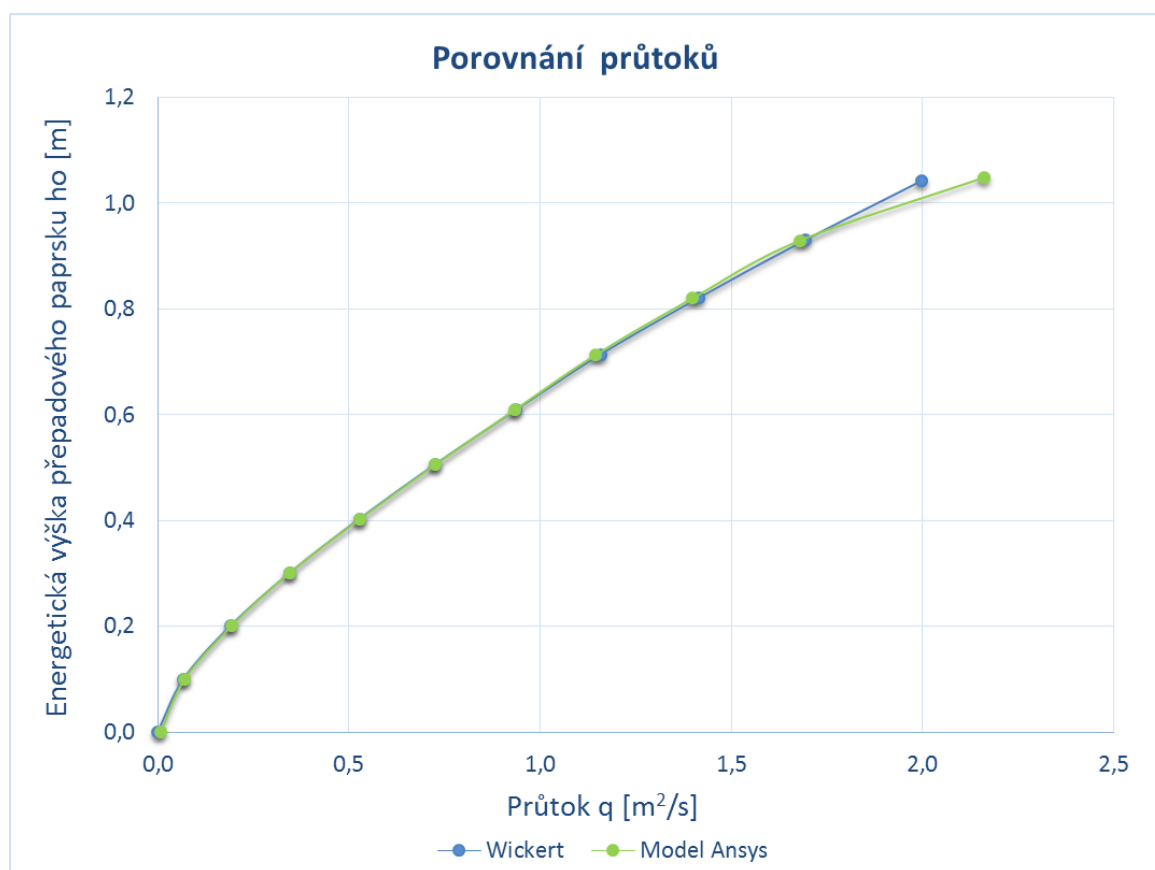
křivkou je značen vypočítaný průběh hydrodynamických momentů z tlaků v piezometrech zjištěných na fyzikálním modelu prof. Čábelky. Tabulka s hodnotami tlaků v piezometrech je v Příloze A. Zelenými body jsou značeny hodnoty hydrodynamických momentů zjištěných matematickým modelem. Dále je na Obr. 5.3 černě zobrazen kladný i záporný 5% interval okolo průběhu momentů uváděných z měření prof. Čábelky. Ze zobrazených průběhů hydrodynamických momentů je patrné, že rozdíl mezi hodnotami získanými matematickým modelem a hodnotami z měření prof. Čábelky v poloze klapky s úhlem $\omega = 68,1^\circ$ až 17° je menší než 5 %. Hodnota hydrodynamického momentu z matematického modelu při sklopení klapky na úhel $\omega = 0^\circ$ vyšla vyšší než při Čábelkových měřeních. Do grafu na Obr. 5.3 je přidána i hodnota hydrodynamického momentu v rozšiřující Poloze 12 matematického modelu, protože je také mimo kladný 5% interval hydrodynamických momentů z Čábelkových měření. Tyto odchylky hodnot momentů mohou být způsobeny rozdílným rozložením podtlaků na přelivné ploše klapky z důvodu rozdílného tvaru předpolí klapky.



Obr. 5.3 – Porovnání hydrodynamických momentů [Vlastní zdroj]

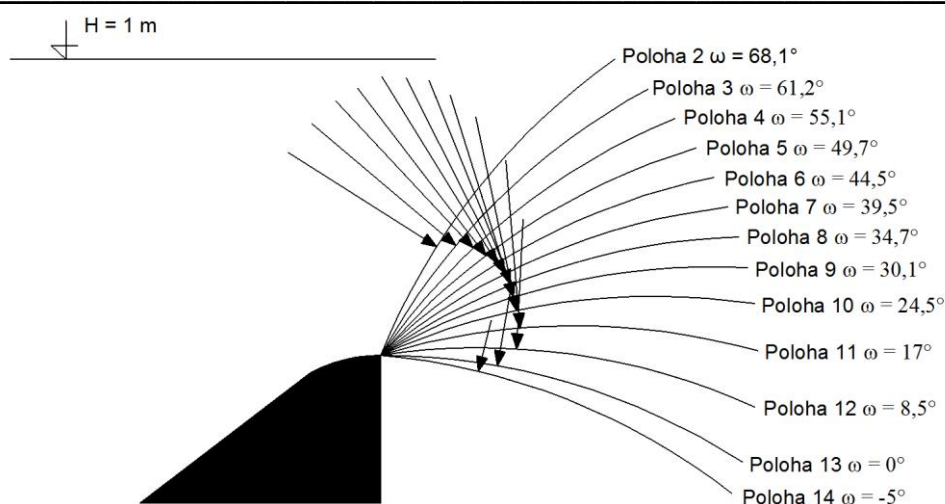
Předpolí při Čábelkových měřeních bylo tvořeno pouze vodorovnou plochou a navazujícím Jamborovým prahem. Oproti tomu v matematickém modelu je předpolí prohloubeno o 1 m více a před klapkou je vytvořena rampa se sklonem 36° . Při sklopení klapky rampa s navazující částí Jamborova prahu způsobuje při obtékání vodou podtlaky již u osy otáčení klapky, které při použití pouze Jamborova prahu nenastávají.

Na Obr. 5.4 – *Porovnání průtoků* je zobrazeno porovnání specifických průtoků zjištěných matematickým modelem a vypočítaných pomocí empirických vzorců se stejným postupem, jaký je popsán v kapitole 5.1, ale s úvahou předpolí pouze s Jamborovým prahem. Jak je z grafu patrné, průtoky se opět liší pouze při velkých sklopeních klapky.



Obr. 5.4 – Porovnání průtoků [Vlastní zdroj]

Na Obr. 5.5 – *Změny působíště a velikosti hydrodynamické síly při sklápění klapky* jsou schematicky zobrazeny velikosti hydrodynamických sil F_h ve zvoleném měřítku v bodech jejich působíště ve 13 polohách sklopení klapky. Hodnoty jsou zjištěny pomocí vytvořeného matematického modelu. Úroveň hladiny horní vody je stejně jako při měření na fyzikálním modelu prof. Čábelky udržována na konstantní úrovni $H = 1\text{ m}$.



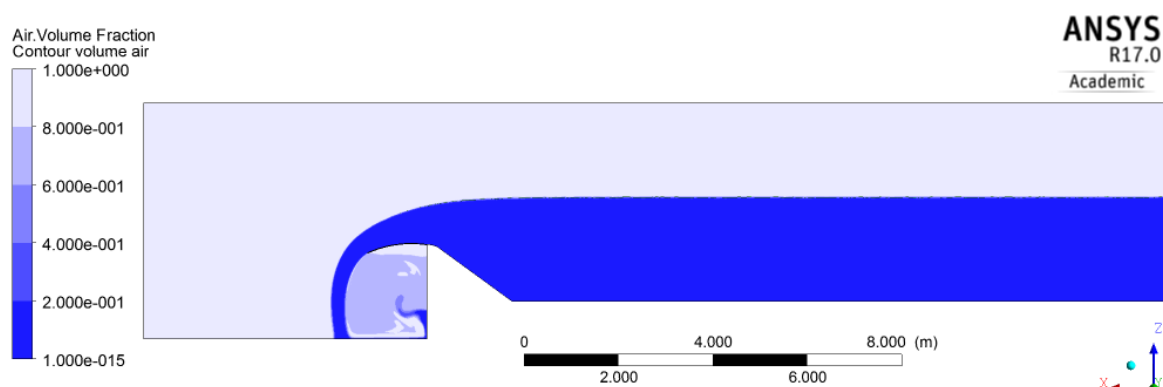
Obr. 5.5 – Změny působíště a velikosti hydrodynamické síly při sklápění klapky [Vlastní zdroj]

5.3 Srovnání s Průchovým pokusem

Matematický model je také vytvořen tak, aby se část dílčích modelů svými podmínkami téměř shodovala s podmínkami fyzikálního modelu, který byl proveden ve vodohospodářské laboratoři FSv ČVUT v Praze, v roce 1986 pod vedením Doc. Průchy. V rámci fyzikálního modelu byly zjištěny hodnoty celkových momentů při hydrodynamickém zatížení horní vodou, při zatížení od dolní vody a také při zatížení podtlaky na návodní straně duté klapky. Prostor pod konstrukcí klapky v tomto fyzikálním modelu není zavzdušněn. Fyzikální model byl proveden na typizované duté klapce s úhlem $\omega = 75^\circ$, hradicí výškou $H = 0,15$ m a poloměrem zakřivení hradicího plechu $R = 2,25 \cdot H$. Postup a podmínky fyzikálního modelu jsou podrobněji popsány v kapitole 3.4.1. Vybrané hodnoty celkových sklopných momentů bez vlivu dolní vody jsou pomocí vzorců (3.18), (3.19) a (3.20) a úpravy ramene k nové ose otáčení přepočítány na celkové sklopné momenty pro klapku s hradicí výškou $H = 1$ m a s úhlem $\omega = 68,1^\circ$. Díky přepočtu na stejnou konstrukci klapky a znalosti zákonitosti popsané ve vzorci (3.21) můžeme porovnat hodnoty celkového sklopného momentu M_c , zjištěné na fyzikálním modelu bez zavzdušnění pod klapkou, s hodnotami hydrodynamických momentů M_h , které jsou zjištěny matematickým modelem se zavzdušněním.

Pro porovnání je vytvořen jeden dílčí model s polohou klapky $\omega = 8,5^\circ$ a s výškou hladiny horní vody $H = 1$ m, se stejným nastavením, jaké je popsáno v kapitolách 4.2.1 až 4.2.3. Jediný rozdíl oproti ostatním dílčím modelům je, že prostor pod přepadovým paprskem není zavzdušněn. Okrajová podmínka Opening ve svislé stěně pod klapkou a na spodní straně hradicího plechu klapky je nahrazena okrajovou podmínkou Wall. Po

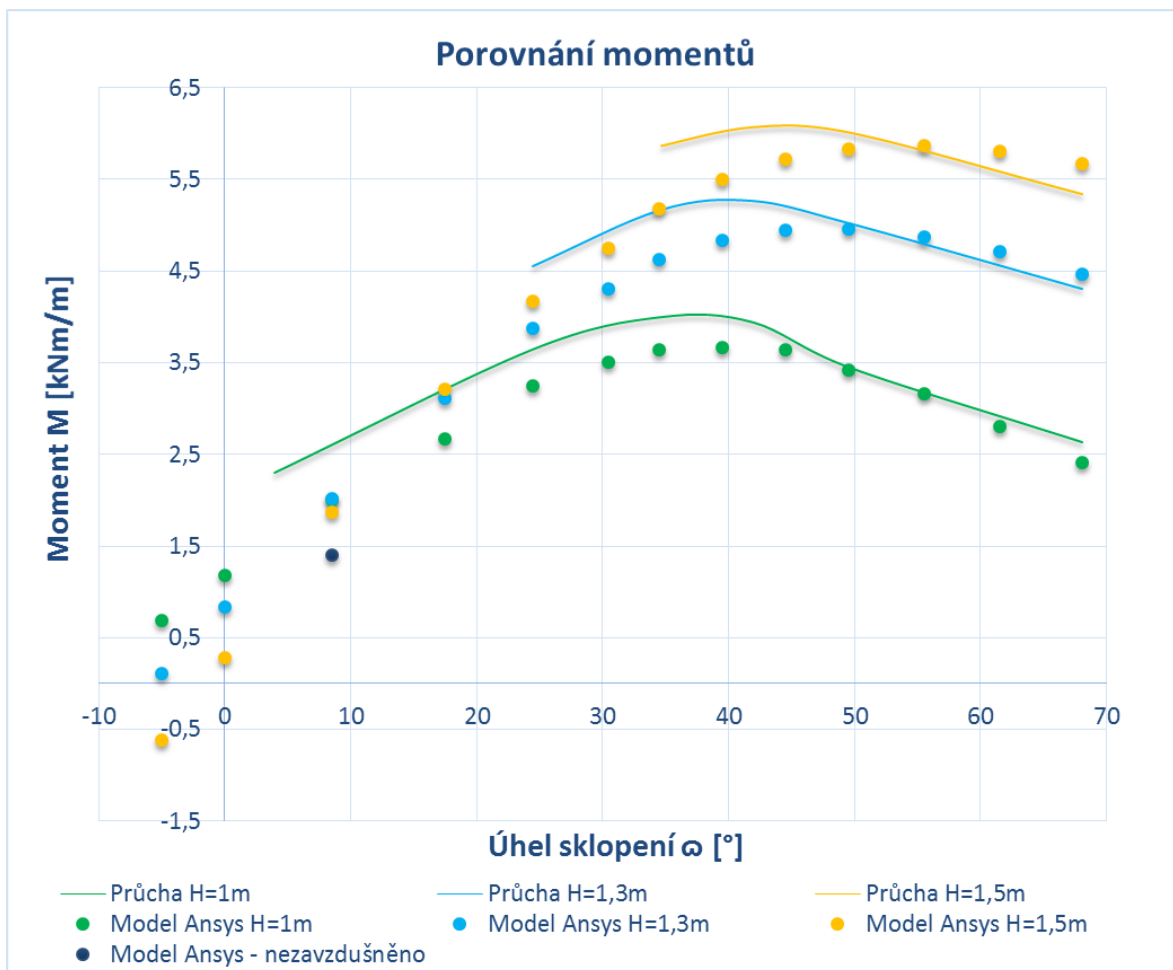
provedení výpočtu je stejným způsobem, jako u předchozích dílčích modelů, získána a vyhodnocena hodnota hydrodynamického momentu od proudící vody a hodnota momentu od podtlaku na vzdušní straně klapky. Hodnota celkového sklopného momentu je určena pomocí vzorce (3.21). Na *Obr. 5.6 – Model bez zavzdušnění prostoru pod klapkou* je zobrazena vizualizace obrysu rozdělení objemů tekutin přidáného dílčího modelu bez zavzdušnění pod klapkou.



Obr. 5.6 – Model bez zavzdušnění prostoru pod klapkou[Vlastní zdroj]

Na *Obr. 5.7 – Porovnání momentů* jsou zobrazeny celkové sklopné momenty s vlivem podtlaku pod konstrukcí klapky získané fyzikálním modelem (značeny barevně rozlišenými křivkami, pojmenovány „Průcha“), hydrodynamické momenty bez vlivu podtlaku získané matematickým modelem (značeny barevně rozlišenými body) a jedna kontrolní hodnota celkového sklopného momentu získaná matematickým modelem (označena tmavě modrým bodem). Z grafu na *Obr. 5.7* je patrné, že hodnoty celkových momentů jsou ve zdvižených polohách klapky odlišné maximálně o 8 % od hodnot hydrodynamických momentů. Při sklápění klapky hodnoty celkových momentů začínají převažovat nad hodnotami hydrodynamických momentů, protože dochází ve všech třech měřených úrovních hladin k nárůstu podtlaků pod přepadovým paprskem. Za výhodu přetížení vlivem podtlaku pod konstrukcí klapky může být považováno, že při velkém sklopení klapky nedochází ke změně směru otáčení celkového sklopného momentů a nedochází ke změně napětí v podpěrných hydromotorech. Kontrolní hodnota celkového sklopného momentu určena pomocí upraveného matematického modelu se od hodnoty celkového momentu, zjištěného fyzikálním modelem, liší přibližně o 60 %. Příčinou tohoto velkého rozdílu může být různé množství pohlcovaného vzduchu proudem vody na fyzikálním modelu a při matematické simulaci, které způsobí odlišné hodnoty podtlaků

pod přepadovým paprskem. Různé podtlaky pod konstrukcí klapky ovlivňují i hydrodynamické zatížení hradícího plechu. [17]



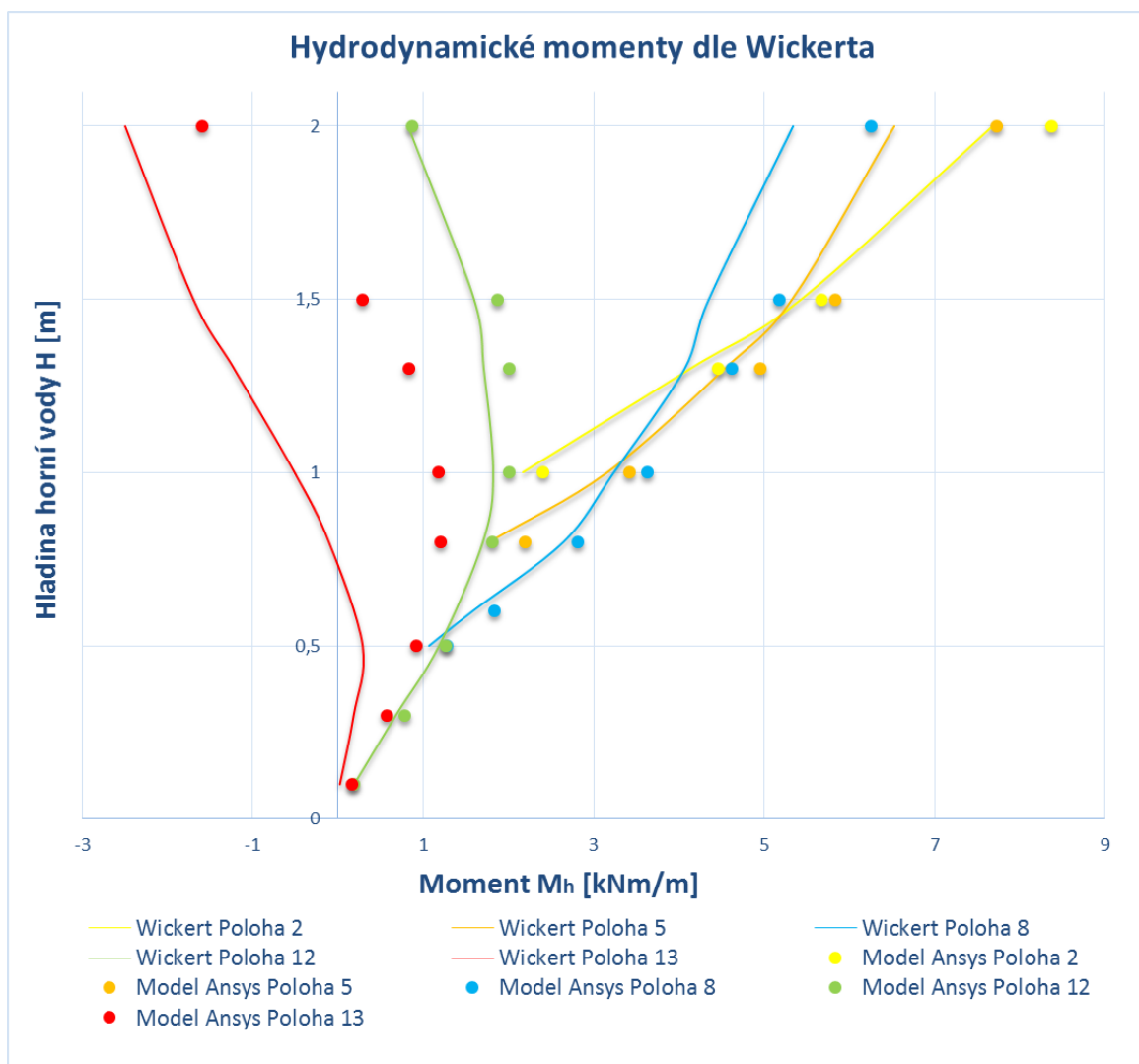
Obr. 5.7 – Porovnání momentů [Vlastní zdroj]

5.4 Srovnání s hydrodynamickými momenty dle Wickerta

K analýze hodnot hydrodynamických momentů z matematického modelu lze využít i postup popsáný pány Wickertem a Schmaußerem v knize [21]. V kapitole 3.5 je podrobněji popsán postup určení hydrodynamických momentů bez využití fyzikálních či matematických modelů. Postup je prováděn pomocí vzorců (3.24) až (3.27). V Příloze B, C a D jsou zobrazeny tři pomocné grafy. Pomocí tohoto postupu jsou stanoveny hydrodynamické momenty pro Polohy 2, 5, 8, 12 a 13 při úvaze stejné konstrukce duté klapky a při stejných podmínkách přepadu.

Na Obr. 5.8 – *Porovnání momentů dle Wickerta* jsou zobrazeny hodnoty hydrodynamických momentů určených Wickertovým postupem (značeny barevně rozlišenými křivkami) a hodnoty momentů získaných matematickým modelem při sklápění

klapky (značeny barevně rozlišenými body). Shodu mezi hydrodynamickými momenty určenými dvěma způsoby lze označit za poměrně dobrou. O Polohách 2, 5, 8 a 12 lze prohlásit, že se jejich hodnoty neliší o více než 20 %. Z Obr. 5.8 je patrné, že v Poloze 13 je rozdíl hodnot hydrodynamických momentů větší. Při postupu stanovení hydrodynamických momentů dle Wickerta vychází hodnoty momentů záporně oproti hodnotám momentů stanovených matematickým modelem. Z toho vyplývá, že na hradicím plechu dle postupu Wickerta vychází mnohem větší podtlaky při převádění přepadového paprsku o stejné výšce než na konstrukci dle matematického modelu.



Obr. 5.8 – Porovnání momentů dle Wickerta [Vlastní zdroj]

6 ZÁVĚR

Hlavní cíl této diplomové práce byl vytvořit fungující 2D CFD matematický model přepadu vody přes zjednodušenou konstrukci duté klapky bez vlivu dolní vody a se zavzdušněným prostorem pod klapkou. Hradící plech klapky byl uvažován jako kružnicový oblouk s bodem otáčení na začátku oblouku bez nutných konstrukčních odchylek. Zjednodušený tvar hradícího plechu oproti reálnému neuvažuje spodní zakřivený úsek pro dosedání těsnění a prostor pro oka čepů ložisek. Pomocí modelu měly být stanoveny hodnoty průtoků přes konstrukci klapky a hydrodynamické zatížení návodní strany klapky bez vlivu spodní vody a bez vlivu podtlaků pod přepadovým paprskem.

Vytvořený matematický model se skládá z 88 dílčích modelů, které simulují přepad vody přes konstrukci klapky při různém sklopení klapky a při různých úrovních hladiny horní vody. Díky množství modelovaných poloh klapky a rozsahu modelovaných úrovní hladin jsme schopni dobře popsat průtokové charakteristiky přepadu přes konstrukci duté klapky. Při vyhodnocování dat průtoků získaných z modelu bylo zjištěno, že zavedený předpoklad extrapolace rozsahu grafu závislosti přepadového součinitele μ na úhlu sklopení a výšce přepadového paprsku byl špatný. V rámci diplomové práce je popsána a graficky zobrazena zjištěná závislost přepadového součinitele μ na úhlu sklopení ve větším rozsahu a na výšce přepadového paprsku, která vychází z dat zjištěných matematickým modelem. Pomocí tohoto rozšířeného grafu je možné určit hodnoty průtoků i pro jiné konstrukce dutých klapek při zachování křivosti hradícího plechu. Také byl zjištěn nárůst průtoku při větším sklopení, než je obvyklá sklopená poloha klapky. Nárůst je přibližně o 3-8 %, ovšem za cenu vzniku velkých sklopných moment s opačným směrem otáčení.

Díky velkému množství modelovaných poloh klapky jsme také schopni popsat změny hydrodynamického zatížení při sklápění klapky až do polohy o 5° více sklopené, než je obvyklé u dutých klapek. Vyhodnocením hydrodynamického zatížení při sklápění klapky byly zjištěny změny délky ramene síly k ose otáčení, které jsou důležité při návrhu pohybovacího mechanismu. Pro kontrolu správnosti dat byly získané hodnoty hydrodynamického zatížení porovnány s hodnotami získanými na fyzikálních modelech provedených v minulosti. Byla zjištěna dobrá shoda v polohách s úhlem vztyčení $\omega = 68,1^\circ$ až 15° , při větším sklopení klapky se data značně rozcházejí z důvodů rozdílného tvaru předpolí modelu, různé pohltivosti vzduchu přepadového paprsku, nebo kvůli pominutí konstrukčních detailů konstrukce.

Veškeré veličiny hydrodynamického zatížení získané modelem jsou stanoveny na konstrukci s návrhovou hrazenou výškou $H = 1$ m a s úhlem vztyčení $\omega = 68,1^\circ$. Pomocí vzorců uvedených v práci je možné přepočítat hodnoty hydrodynamického zatížení na konstrukce se shodnou křivostí hradícího plechu, ale s jinou hradící výškou, nebo s jiným úhlem vztyčení.

Jako všechna měření, je i matematická simulace zatížena nepřesnostmi a chybami. Největší vliv na nepřesnost dat má kvalita výpočetní sítě modelu. Při nastavování modelu bylo otestováno několik variant hustot výpočetní sítě. Vybrána byla varianta s velmi hustou sítí okolo konstrukce duté klapky a u předpolí s postupným zvětšováním elementů směrem k okrajovým podmínkám. Tato síť zajišťuje dostatečné množství elementů v důležitých oblastech modelu, ale celkové množství elementů zbytečně neprodlužuje výpočet. Další nepřesnosti mohou nastat při zjednodušené definici okrajových podmínek. V modelu je zanedbána drsnost nepropustných stěn okrajovou podmínkou No slip Wall. Při nastavování okrajové podmínky na vtoku pomocí Total pressure, kde je zároveň definována výška hladiny a energetická výška, docházelo v ustálených výsledcích k rozdílu požadované a výsledné hladiny v rozsahu \pm několik milimetrů. Nepřesná poloha hladiny vytvořila na průtocích chybu maximálně 3 %.

Matematický model obsahuje zjednodušenou ideální konstrukci duté klapky. Při dalším využití získaných dat je nutné upravit data pro skutečnou konstrukci se skutečnými konstrukčními detaily.

Získané výsledky jsou důkazem, že CFD simulace jsou vhodným nástrojem jak pro zjištění průtokových charakteristik, tak pro stanovení hydrodynamického zatížení konstrukce dutých klappek při různých zatěžovacích provozních i havarijních stavech.

7 SEZNAM ZDROJŮ A POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BOOR, B. KUNŠTÁTSKÝ, J. PATOČKA, C. *Hydraulika pro vodohospodářské stavby*. Praha, SNTL – Nakladatelství technické literatury a Nakladatelství ALFA, n. p., Bratislava, 1968. 516 str.
- [2] BROŽA, V. SATRAPA, L. *Hydrotechnické stavby I*. Praha, Nakladatelství ČVUT, 2007. 170 str. ISBN 978-80-01-03653-2
- [3] ČÁBELKA, J. KUNŠTÁTSKÝ, J. *Jezy*. Praha, Státní nakladatelství technické literatury a Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1966, 556 str.
- [4] ČIHÁK, F. MEDŘICKÝ, V. *Hydrotechnické stavby 20, Navrhování jezů*. Praha, Vydavatelství ČVUT, 2001. 154 str. ISBN 80-01-02402-4
- [5] ERBISTI, P. *Desing of hydraulic gates*. Lisse, A.A. Balkema publishers, 2004. 351 str. ISBN 90-5809-6211
- [6] GABRIEL, P. GRANDTNER, T. PRŮCHA, M. VÝBORA, P. *Jezy*. Praha, SNTL – Nakladatelství technické literatury a ALFA – Vydavatelství technickej a ekonomickej literatúry, Bratislava, 1989. 453 str.
- [7] GABRIEL, P. MEDŘICKÝ, V. *Navrhování plavebních stupňů*. Praha, Vydavatelství ČVUT, 1994. 189 str. ISBN 80-01-00517-8
- [8] HYDROPROJEKT PRAHA. *Navrhování a výpočet klapkových hradících konstrukcí*. Typizační směrnice, 1980. 204 str.
- [9] KOZUBKOVÁ, M. *Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX*. Ostrava, VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2008. 153 str.
- [10] MEDŘICKÝ, V. VALENTA, P. *Hydrotechnické stavby I, Navrhování jezů*. Praha, Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2009. 151 str. ISBN 978-80-01-04309-7
- [11] MEDŘICKÝ, V. VALENTA, P. *Ocelové konstrukce vodohospodářských staveb*. Praha, Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2009. 138 str. ISBN 978-80-01-04310-3
- [12] PICKA, D. ŠULC, J. *Využití CFD simulace k stanovení zatěžovacích charakteristik hladinového klapkového uzávěru*. Vodní hospodářství, 11/2005. Str. 13 – 18.
- [13] PRŮCHA, M. ČIHÁK, F. MEDŘICKÝ, V. *Výzkum zatížení duté klapky*. Praha 1986. Výzkumná zpráva ČVUT. 20 str.

- [14] PŘÍHODA, J. LOUDA, P. *Matematické modelování turbulentního proudění*. Praha, Nakladatelství ČVUT, 2007. 111 str. ISBN 978-80-01-03623-5
- [15] STROBL, T. *Grundkurs "Wasserbau und Wasserwirtschaft"*. Technische Universität München, 2005. 219 str.
- [16] ŠKAŘUPOVÁ, E. *Modelování plnění plavební komory České Vrbné*. České vysoké učení technické, Fakulta stavební, Praha 2013. Vedoucí diplomové práce Dr. Ing. Nowak Petr
- [17] ŠULC, J. *Stanovení maximálního hydrodynamického zatížení klapkového hladinového uzávěru*. Vodní hospodářství a ochrana ovzduší, 2/1993. Str. 3 – 7.
- [18] U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. *Hydraulic design of lock culvert valves*. Engineer Manual, 1110-2-1610, 1989.
- [19] VLČEK, P. *Modelování turbulentního proudění*. Praha, České Vysoké Učení Technické, 2013.
- [20] VÝBORA, P. *Jezy*. Praha, SNTL – Nakladatelství technické literatury n.p., 1985. 146 str.
- [21] WICKERT, G. SCHMAUSSER, G. *Stahlwasserbau*. Berlin/Heidelberg, Springer – Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1971. 582 str. ISBN 3-540-05269-0
- [22] ANSYS, Inc.: *Ansys CFX Tutorials*, Program documentation for Release 15.0 , November 2013
- [23] MATOUŠEK, V. Online přednášky k předmětu Hydraulika 3 na Fsv ČVUT Praha Dostupné z WWW:
http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Users/Matousek/MujWeb_soubory/Page437.htm
- [24] Dostupný z WWW: <http://www.ansys.com/products/Fluids/ANSYS-CFX>
- [25] Dostupný z WWW: <https://en.wikipedia.org/wiki/Ansys>
- [26] Dostupný z WWW: <http://www.pointwise.com/yplus/>

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 2.1 – Základní typy klapek a) desková, b) troubová, c) dutá [6]
- Obr. 3.1 – Doporučený příčný řez dutou klapkou[10]
- Obr. 3.2 – Obrisy přepadového paprsku[6]
- Obr. 3.3 – Práh jezu s klapkovým uzávěrem[6]
- Obr. 3.4 – Zavěšená dutá klapka[6]
- Obr. 3.5 – Podepřená dutá klapka[11]
- Obr. 3.6 – Jamborův nízký práh[10]
- Obr. 3.7 – Graf pro rozšířený redukční součinitel dle výšky přepadového paprsku[4]
- Obr. 3.8 – Graf závislosti rozšířeného přepadového součinitele[6]
- Obr. 3.9 – Hydrodynamický tlak na klapce[2]
- Obr. 3.10 – Schéma příčného řezu zkušební klapky s vyznačeným umístěním piezometrů
[10, upraveno pro DP]
- Obr. 3.11 – Průběhy hydrodynamických tlaků zjištěných fyzikálním výzkumem
[Vlastní zdroj]
- Obr. 3.12 – Schéma segmentového pohyblivého uzávěru [18, upraveno pro DP]
- Obr. 4.1 – Tvary konečných objemů [9, upraveno pro DP]
- Obr. 4.2 – Schéma průběhu výpočtu dle různých metod simulace turbulence
[9, upraveno pro DP]
- Obr. 4.3 – Schéma výpočetní oblasti modelu[Vlastní zdroj]
- Obr. 4.4 – Počátek soustavy souřadnic[Vlastní zdroj]
- Obr. 4.5 – Výpočetní síť modelu[Vlastní zdroj]
- Obr. 4.6 – Pomocné výrazy[Vlastní zdroj]
- Obr. 4.7 – Iniciační výpočetní stav[Vlastní zdroj]
- Obr. 4.8 – Schéma okrajových podmínek modelu[Vlastní zdroj]
- Obr. 4.9 – Strhávání přepadového paprsku[Vlastní zdroj]
- Obr. 4.10 – Schéma sklápění klapky v modelu a konstantní hladiny [Vlastní zdroj]
- Obr. 4.11 – Extrapolovaný graf pro přepadový součinitel [Vlastní zdroj]
- Obr. 4.12 – Vizualizace: Obrys rozdělení objemů tekutin (nahore) a obrys tlaků (dole)
[Vlastní zdroj]
- Obr. 4.13 – Vizualizace: Vektory rychlosti proudění vody (nahore) a vektory rychlosti
proudění vzduchu (dole) [Vlastní zdroj]

- Obr. 4.14 – Vizualizace:Proudnice přepadu [Vlastní zdroj]
- Obr. 4.15 – Vizualizace: Obrys tlaků na rozšířené klapce [Vlastní zdroj]
- Obr. 4.16 – Vztahy vstupních hodnot[Vlastní zdroj]
- Obr. 4.17 – Graf průběhu tlaku na hradícím plechu klapky ve směru X[Vlastní zdroj]
- Obr. 4.18 – Graf průběhu tlaku na hradícím plechu klapky ve směru Z[Vlastní zdroj]
- Obr. 4.19 – Měrné křivky z dat z modelu[Vlastní zdroj]
- Obr. 4.20 – Přepadový součinitel μ z dat z modelu[Vlastní zdroj]
- Obr. 4.21 – Průběhy hydrodynamických tlaků zjištěné matematickým modelem
[Vlastní zdroj]
- Obr. 4.22 – Hydrodynamické síly[Vlastní zdroj]
- Obr. 4.23 – Schéma působení hydrodynamické síly[Vlastní zdroj]
- Obr. 4.24 – Působíště hydrodynamických sil[Vlastní zdroj]
- Obr. 4.25 – Ramena hydrodynamických sil[Vlastní zdroj]
- Obr. 4.26 – Hydrodynamické momenty[Vlastní zdroj]
- Obr. 4.27 – Moment od vlastní tíhy konstrukce klapky [Vlastní zdroj]
- Obr. 4.28 – Moment od hydrodynamického zatížení a od vlastní tíhy konstrukce
[Vlastní zdroj]
- Obr. 4.29 – Grafické shrnutí zjištěných veličin pro polohu 7 [Vlastní zdroj]
- Obr. 5.1 – Porovnání měrných křivek [Vlastní zdroj]
- Obr. 5.2 – Porovnání s proudnicovými přelivnými plochami [Vlastní zdroj]
- Obr. 5.3 – Porovnání hydrodynamických momentů [Vlastní zdroj]
- Obr. 5.4 – Porovnání průtoků [Vlastní zdroj]
- Obr. 5.5 – Změny působíště a velikosti hydrodynamické síly při sklápění klapky
[Vlastní zdroj]
- Obr. 5.6 – Model bez zavzdušnění prostoru pod klapkou[Vlastní zdroj]
- Obr. 5.7 – Porovnání momentů[Vlastní zdroj]
- Obr. 5.8 – Porovnání momentů dle Wickerta[Vlastní zdroj]

9 SEZNAM TABULEK

Tab. 4.1 – Parametry úhel sklopení a úroveň hladiny horní vody všech dílčích modelů

[Vlastní zdroj]

Tab. 4.2 – Výšky přepadových paprsků v dílčích modelech [Vlastní zdroj]

Tab. 4.3 – Hodnoty hydrostatického zatížení [Vlastní zdroj]

Tab. 4.4 – Hodnoty zatížení od vlastní tíhy [Vlastní zdroj]

10 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

b	Světlá šířka přepadu	[m]
b_0	Účinná šířka pole přelivu	[m]
F	Síla	[kN]
F_h	Hydrostatická nebo hydrodynamická síla	[kN]
F_{hx}	Hydrodynamická síla ve směru x	[kN]
F_{hz}	Hydrodynamická síla ve směru z	[kN]
F_g	Síla od vlastní tíhy	[kN]
F_p	Výslednice podtlaků	[kN]
g	Tíhové zrychlení	[m/s ²]
H	Výška hradící konstrukce/ Hloubka vody před konstrukcí	[m]
H_p	Výška Jamborova prahu	[m]
H_m	Hradící výška jednotkového modelu	[m]
h	Výška přepadového paprsku	[m]
h_0	Energetická výška přepadového paprsku	[m]
h_m	Modelová výška přepadového paprsku	[cm]
h_n	Návrhová výška přepadového paprsku	[m]
k	Faktor měřítka	[-]
l_n	Délka oblouku reálné konstrukce	[cm]
l_m	Délka oblouku na modelu	[cm]
m	Pomocný součinitel	[-]
M_{KL}	Rozšířený přepadový součinitel	[-]
M_L	Rozšířený přepadový součinitel pro jiné h	[-]
M	Moment od síly	[kNm]
M_h	Moment od hydrodynamického zatížení	[kNm]
M_p	Moment od podtlaků na vzdušní straně	[kNm]
M_g	Moment od vlastní tíhy	[kNm]
M_c	Celkový sklopný moment	[kNm]
M_m	Hydrodynamický moment na modelu	[pcm/cm]
n	Počet míst bočních kontrakcí	[ks]
o_x	Složka tíhového zrychlení ve směru osy x	[m/s ²]
p	Hydrostatický tlak	[Pa]
p_m	Tlak získaný modelovým výzkumem	[Pa]

Q	Průtok	$[\text{m}^3/\text{s}]$
q	Specifický průtok	$[\text{m}^2/\text{s}]$
R	Poloměr zaoblení	$[\text{m}]$
R_n	Poloměr zakřivení reálné konstrukce	$[\text{cm}]$
R_m	Poloměr zakřivení modelu	$[\text{cm}]$
r	Rameno od osy otáčení	$[\text{m}]$
r_g	Rameno od osy otáčení síly od vlastní tíhy	$[\text{m}]$
r_h	Rameno od osy otáčení hydrodynamické síly	$[\text{m}]$
r_p	Rameno od osy otáčení síly od podtlaků	$[\text{m}]$
Re	Reynodsovo číslo	$[-]$
s_ω	Délka maximální tětiny hradící stěny s úhlem ω	$[\text{m}]$
$s_{\omega 1}$	Délka maximální tětiny hradící stěny s úhlem ω_1	$[\text{m}]$
t	Časový krok	$[\text{s}]$
u	Bodová rychlost ve směrech x, y, z	$[\text{m}/\text{s}]$
v	Rychlost proudění	$[\text{m}/\text{s}]$
v_0	Rychlost proudění před přelivem	$[\text{m}/\text{s}]$
V	Rozměry konstrukce klapky	$[\text{m}^3]$
α	Úhel tečny klapky ve vrcholu a vodorovné přímky	$[\circ]$
α_i	Coriolisovo číslo zohledňující tvar koryta	$[-]$
δ	Plocha výsledného zatěžovacího obrazce	$[\text{m}^2]$
λ	Součinitel modelové podobnosti	$[-]$
λ_m	Součinitel modelové podobnosti	$[-]$
μ_d	Dynamická viskozita	$[\text{Ns}/\text{m}^2]$
μ	Součinitel přepadu	$[-]$
μ_{po}	Rozšířený redukční součinitel	$[-]$
ν	Kinematická viskozita	$[\text{m}^2/\text{s}]$
ξ	Tvarový součinitel	$[-]$
ρ	Měrná hmotnost kapaliny	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
ρ_o	Objemová hmotnost oceli ($\rho=7850$)	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
ρ_v	Měrná hmotnost vody	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
σ	Normálové napětí	$[\text{Pa}]$
σ_z	Součinitel zatopení	$[-]$
τ	Tangenciální napětí	$[\text{Pa}]$
ω	Úhel tečny klapky v bodě otáčení a vodorovné přímky	$[\circ]$

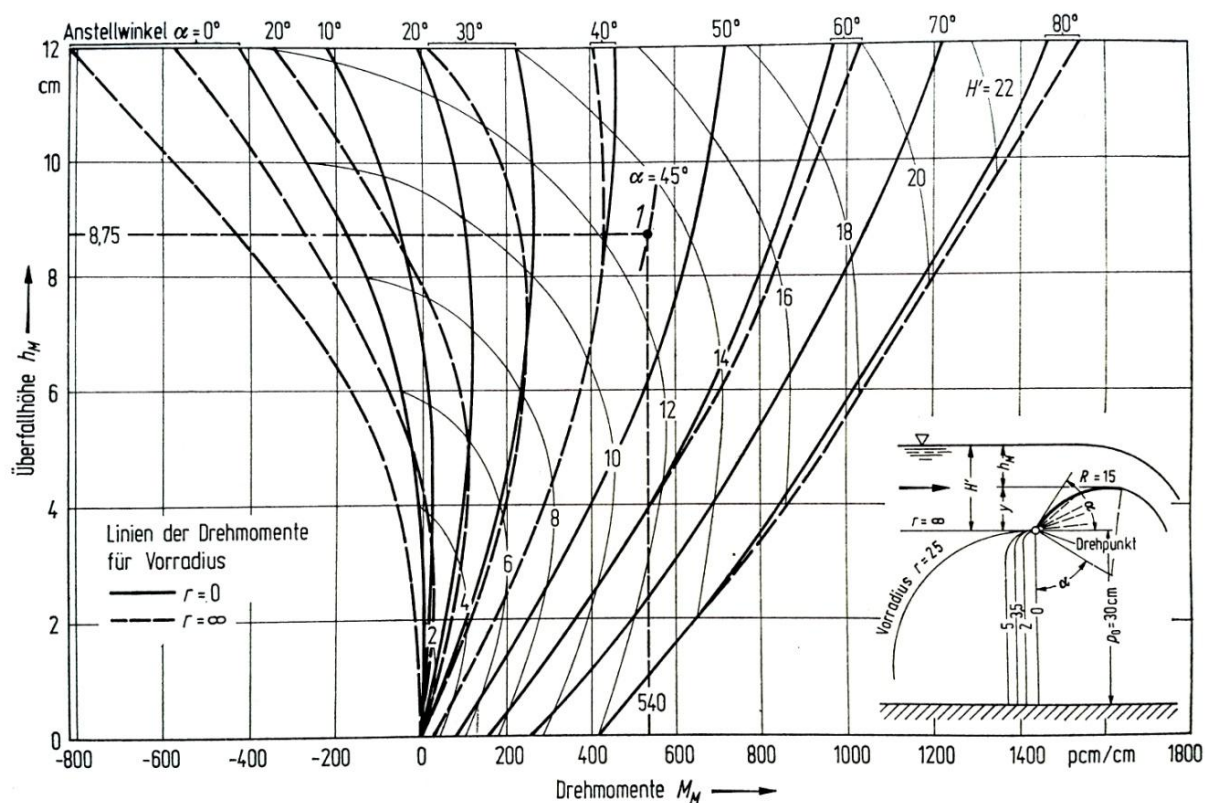
11 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A - Hodnoty hydrodynamických tlaků v místech piezometrů zjištěné fyzikálním modelem

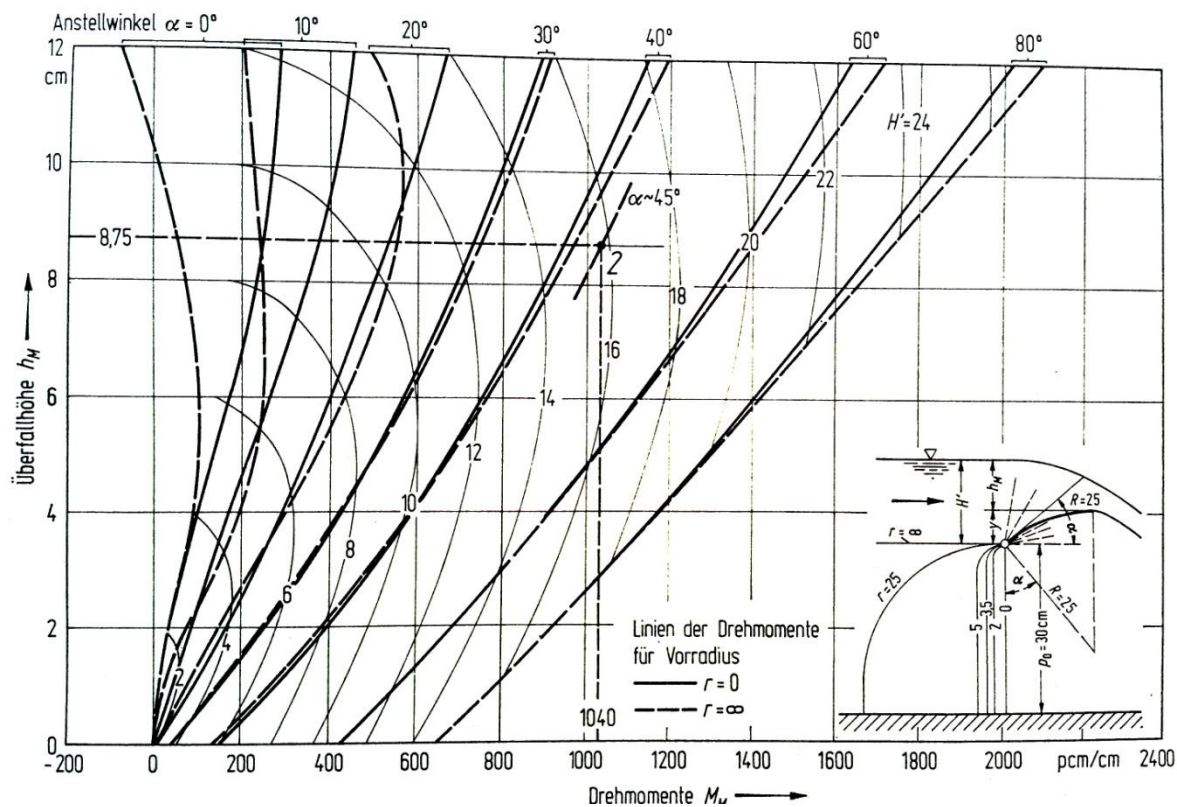
Poloha klapky	Číslo piezometru												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0,02	0,04	0,07	0,13	0,16	0,20	0,24	0,27	0,30	0,34	0,38	0,42
2	0	0,06	0,10	0,14	0,19	0,23	0,26	0,29	0,32	0,35	0,38	0,41	0,45
3	0	0,08	0,15	0,20	0,25	0,28	0,31	0,34	0,37	0,40	0,43	0,46	0,49
4	0	0,10	0,18	0,24	0,29	0,32	0,35	0,38	0,41	0,44	0,47	0,50	0,52
5	0	0,11	0,21	0,27	0,32	0,36	0,38	0,41	0,43	0,46	0,49	0,52	0,55
6	0	0,10	0,21	0,28	0,34	0,38	0,40	0,43	0,45	0,48	0,51	0,54	0,56
7	0	0,09	0,19	0,27	0,34	0,37	0,40	0,43	0,45	0,46	0,51	0,54	0,57
8	0	0,08	0,18	0,25	0,31	0,35	0,39	0,41	0,44	0,47	0,50	0,53	0,56
9	0	0,06	0,16	0,22	0,29	0,33	0,36	0,39	0,42	0,44	0,47	0,49	0,52
10	0	0,03	0,07	0,14	0,21	0,24	0,28	0,30	0,33	0,36	0,38	0,41	0,44
11	-0,02	0,00	0,01	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,14

Poloha klapky	Číslo piezometru											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0,45	0,50	0,54	0,59	0,62	0,66	0,70	0,75	0,79	0,88	0,93	1,00
2	0,48	0,52	0,56	0,60	0,64	0,68	0,72	0,76	0,80	0,88	0,93	1,00
3	0,52	0,56	0,59	0,62	0,66	0,70	0,74	0,78	0,81	0,89	0,94	1,00
4	0,55	0,59	0,62	0,66	0,68	0,72	0,76	0,79	0,82	0,90	0,95	1,00
5	0,58	0,61	0,64	0,67	0,70	0,73	0,77	0,80	0,83	0,91	0,95	1,00
6	0,59	0,62	0,65	0,69	0,72	0,75	0,78	0,81	0,84	0,90	0,94	0,99
7	0,60	0,63	0,66	0,70	0,73	0,75	0,78	0,81	0,84	0,90	0,94	0,99
8	0,59	0,62	0,65	0,68	0,71	0,73	0,76	0,79	0,83	0,90	0,94	0,98
9	0,55	0,58	0,61	0,65	0,68	0,70	0,73	0,76	0,80	0,87	0,91	0,98
10	0,47	0,50	0,53	0,57	0,59	0,61	0,64	0,68	0,72	0,80	0,85	0,89
11	0,18	0,20	0,21	0,22	0,24	0,26	0,27	0,29	0,30	0,31	0,31	0,31

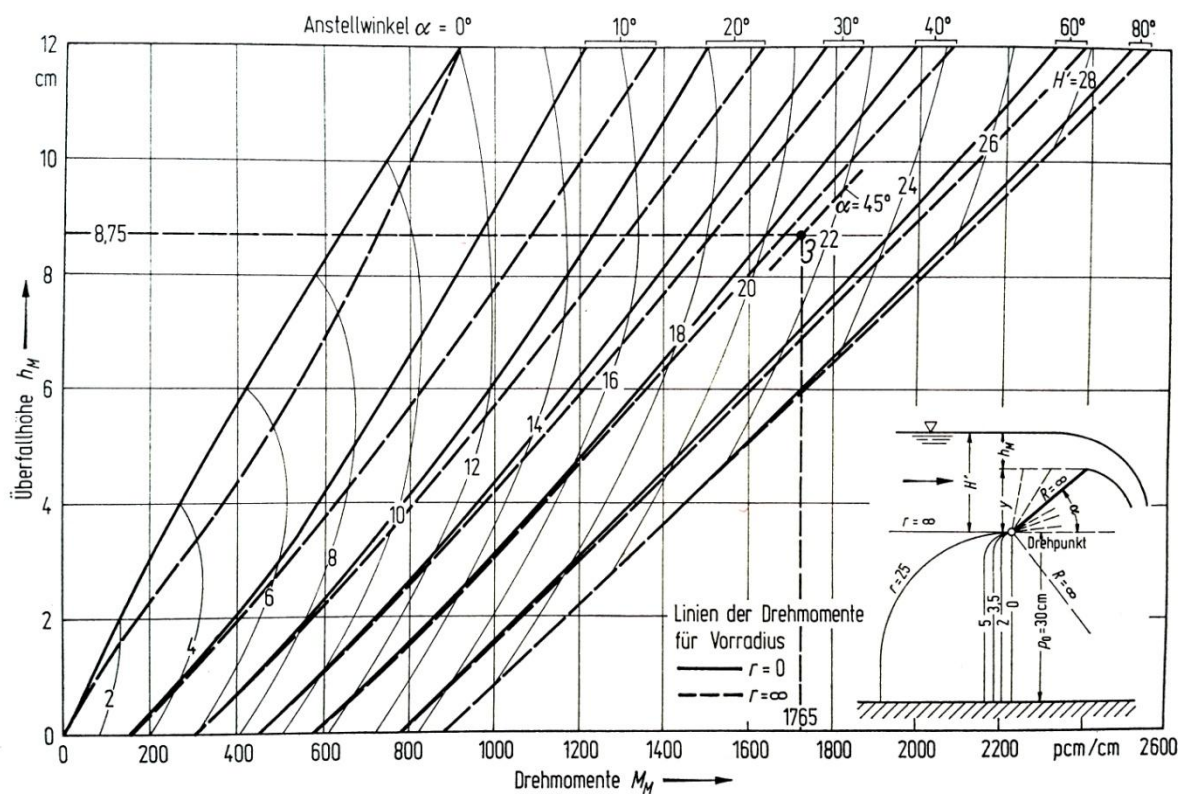
Příloha B – Graf závislosti hydrodynamického momentu [pcm/cm], výšky přepadového paprsku [cm] a úhlu sklopení [°] konstrukce modelu s poloměrem zakřivení $R_{M1} = 15$ cm. [21]



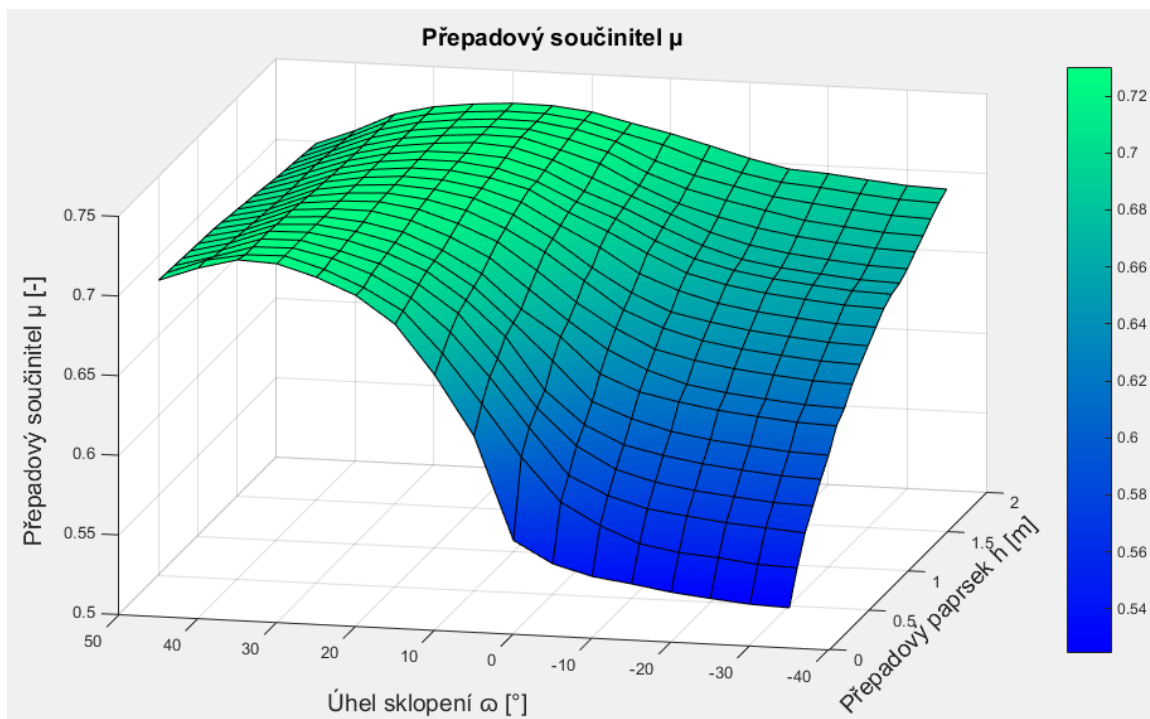
Příloha C - Graf závislosti hydrodynamického momentu [pcm/cm], výšky přepadového paprsku [cm] a úhlu sklopení [°] konstrukce modelu s poloměrem zakřivení $R_{M2} = 25$ cm. [21]



Příloha D - Graf závislosti hydrodynamického momentu [pcm/cm], výšky přepadového paprsku [cm] a úhlu sklopení [°] konstrukce modelu s poloměrem zakřivení $R_{M3} = \infty$ cm. [21]



Příloha E – 3D graf extrapolovaného součinitele přepadu.



Příloha F – Tabulka s hodnotami přepadového součinitele μ .

μ	$(h/R) \backslash \omega$	78	73	68	63	58	53	48	43	38	33	28	23	18	13	8	3	-2
h [m]	$(h/R) \backslash \alpha$	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35
0	0,00	0,711	0,72	0,725	0,725	0,718	0,708	0,6908	0,66	0,6231	0,5588	0,545	0,538	0,5351	0,531	0,528	0,526	0,525
0,1	0,04	0,711	0,72	0,725	0,725	0,718	0,708	0,6942	0,669	0,6383	0,6062	0,579	0,566	0,5554	0,551	0,549	0,546	0,545
0,2	0,09	0,71	0,717	0,725	0,725	0,72	0,711	0,6976	0,677	0,6502	0,6197	0,591	0,579	0,5723	0,569	0,566	0,564	0,562
0,3	0,13	0,71	0,717	0,725	0,725	0,72	0,713	0,701	0,684	0,657	0,6272	0,604	0,591	0,5842	0,5801	0,577	0,575	0,574
0,4	0,18	0,71	0,716	0,725	0,725	0,721	0,715	0,7044	0,687	0,6658	0,6333	0,613	0,601	0,596	0,5919	0,589	0,587	0,586
0,5	0,22	0,709	0,715	0,724	0,725	0,722	0,716	0,7061	0,691	0,6695	0,6468	0,622	0,613	0,6062	0,6021	0,599	0,597	0,596
0,6	0,27	0,708	0,715	0,724	0,725	0,723	0,718	0,7078	0,694	0,6732	0,657	0,635	0,625	0,6197	0,6157	0,613	0,611	0,61
0,7	0,31	0,707	0,715	0,723	0,725	0,725	0,72	0,7111	0,699	0,6807	0,662	0,645	0,634	0,6258	0,6217	0,619	0,617	0,616
0,8	0,36	0,707	0,714	0,723	0,725	0,726	0,722	0,7145	0,704	0,6874	0,6688	0,654	0,642	0,636	0,6319	0,629	0,627	0,626
0,9	0,40	0,706	0,714	0,722	0,725	0,726	0,724	0,7179	0,708	0,6942	0,6773	0,66	0,65	0,6434	0,6394	0,637	0,634	0,633
1	0,44	0,705	0,713	0,721	0,725	0,727	0,725	0,7206	0,711	0,6976	0,6807	0,666	0,655	0,6502	0,6461	0,643	0,641	0,64
1,1	0,49	0,704	0,712	0,721	0,725	0,727	0,726	0,722	0,715	0,701	0,6885	0,673	0,664	0,657	0,6529	0,65	0,648	0,647
1,2	0,53	0,704	0,711	0,72	0,725	0,727	0,727	0,7237	0,718	0,7044	0,6935	0,681	0,67	0,6637	0,6597	0,657	0,655	0,654
1,3	0,58	0,704	0,711	0,72	0,725	0,728	0,728	0,7247	0,718	0,7061	0,6966	0,684	0,674	0,6678	0,6637	0,661	0,659	0,658
1,4	0,62	0,703	0,711	0,72	0,725	0,728	0,728	0,7264	0,72	0,708	0,6989	0,687	0,677	0,6698	0,6658	0,663	0,661	0,66
1,5	0,67	0,702	0,711	0,719	0,725	0,728	0,73	0,7281	0,721	0,7112	0,701	0,691	0,681	0,6739	0,6698	0,667	0,665	0,664
1,6	0,71	0,701	0,71	0,719	0,725	0,728	0,73	0,7294	0,723	0,7152	0,7037	0,694	0,687	0,6797	0,6756	0,673	0,671	0,669
1,7	0,76	0,7	0,71	0,719	0,725	0,728	0,73	0,7294	0,724	0,7176	0,7057	0,698	0,691	0,6858	0,6807	0,678	0,676	0,675
1,8	0,80	0,7	0,709	0,719	0,725	0,728	0,73	0,7294	0,726	0,7193	0,7097	0,701	0,695	0,6895	0,6864	0,684	0,681	0,68
1,9	0,84	0,699	0,708	0,719	0,725	0,728	0,73	0,7294	0,726	0,7196	0,7132	0,705	0,698	0,6935	0,6915	0,689	0,686	0,685
2	0,89	0,698	0,708	0,719	0,725	0,728	0,73	0,7294	0,727	0,721	0,7156	0,709	0,702	0,6969	0,6952	0,693	0,69	0,689

Příloha G - Vstupní parametry dílčích modelů

	Dílčí model č.	úhel sklopení ω [°]	úhel sklopení od 76 [°]	úhel sklopení α [°]	Hladina horní vody H [m]	výška paprsku h [m]	rychlost na vtoku [m/s]	Energetická výška na vtoku H_0 [m]
Poloha 1	1	76,0	0	43	1,3	0,2	0,076	1,300
	2	76,0	0	43	1,5	0,4	0,200	1,502
	3	76,0	0	43	2,0	0,9	0,577	2,017
Poloha 2	4	68,1	7,9	35,1	1,0	0,0	0,000	1,000
	5	68,1	7,9	35,1	1,3	0,3	0,141	1,301
	6	68,1	7,9	35,1	1,5	0,5	0,282	1,504
	7	68,1	7,9	35,1	2,0	1,0	0,687	2,024
Poloha 3	8	61,2	14,8	28,2	1,0	0,1	0,031	1,000
	9	61,2	14,8	28,2	1,3	0,4	0,218	1,302
	10	61,2	14,8	28,2	1,5	0,6	0,375	1,507
	11	61,2	14,8	28,2	2,0	1,1	0,808	2,033
Poloha 4	12	55,1	20,9	22,1	0,9	0,1	0,032	0,900
	13	55,1	20,9	22,1	1,0	0,2	0,086	1,000
	14	55,1	20,9	22,1	1,3	0,5	0,305	1,305
	15	55,1	20,9	22,1	1,5	0,7	0,475	1,511
	16	55,1	20,9	22,1	2,0	1,2	0,931	2,044
Poloha 5	17	49,7	26,3	16,7	0,8	0,1	0,033	0,800
	18	49,7	26,3	16,7	1,0	0,3	0,157	1,001
	19	49,7	26,3	16,7	1,3	0,6	0,400	1,308
	20	49,7	26,3	16,7	1,5	0,8	0,581	1,517
	21	49,7	26,3	16,7	2,0	1,3	1,060	2,057
Poloha 6	22	44,5	31,5	11,5	0,7	0,1	0,034	0,700
	23	44,5	31,5	11,5	0,85	0,3	0,125	0,851
	24	44,5	31,5	11,5	1,0	0,4	0,239	1,003
	25	44,5	31,5	11,5	1,3	0,7	0,502	1,313
	26	44,5	31,5	11,5	1,5	0,9	0,694	1,525
	27	44,5	31,5	11,5	2,0	1,4	1,193	2,073
Poloha 7	28	39,5	36,5	6,5	0,6	0,1	0,034	0,600
	29	39,5	36,5	6,5	0,7	0,2	0,093	0,700
	30	39,5	36,5	6,5	0,85	0,4	0,204	0,852
	31	39,5	36,5	6,5	1,0	0,5	0,330	1,006
	32	39,5	36,5	6,5	1,3	0,8	0,612	1,319
	33	39,5	36,5	6,5	1,5	1,0	0,812	1,534
	34	39,5	36,5	6,5	2,0	1,5	1,327	2,090
Poloha 8	35	34,7	41,3	1,7	0,5	0,1	0,035	0,500
	36	34,7	41,3	1,7	0,6	0,2	0,094	0,600
	37	34,7	41,3	1,7	0,8	0,4	0,247	0,803
	38	34,7	41,3	1,7	1,0	0,6	0,427	1,009
	39	34,7	41,3	1,7	1,3	0,9	0,725	1,327
	40	34,7	41,3	1,7	1,5	1,1	0,933	1,544
	41	34,7	41,3	1,7	2,0	1,6	1,465	2,109

	Dílčí model č.	úhel sklopení ω [°]	úhel sklopení od 76 [°]	úhel sklopení α [°]	Hladina horní vody H [m]	výška paprsku h [m]	rychlost na vtoku [m/s]	Energetická výška na vtoku H_0 [m]
Poloha 9	42	30,1	45,9	-2,9	0,4	0,1	0,034	0,400
	43	30,1	45,9	-2,9	0,5	0,2	0,094	0,500
	44	30,1	45,9	-2,9	0,7	0,4	0,247	0,703
	45	30,1	45,9	-2,9	1,0	0,7	0,528	1,014
	46	30,1	45,9	-2,9	1,3	1,0	0,836	1,336
	47	30,1	45,9	-2,9	1,5	1,2	1,056	1,557
	48	30,1	45,9	-2,9	2,0	1,7	1,598	2,130
Poloha 10	49	24,5	51,5	-8,5	0,3	0,1	0,036	0,300
	50	24,5	51,5	-8,5	0,4	0,2	0,097	0,400
	51	24,5	51,5	-8,5	0,6	0,4	0,254	0,603
	52	24,5	51,5	-8,5	0,8	0,6	0,442	0,810
	53	24,5	51,5	-8,5	1,0	0,8	0,645	1,021
	54	24,5	51,5	-8,5	1,3	1,1	0,968	1,348
	55	24,5	51,5	-8,5	1,5	1,3	1,190	1,572
Poloha 11	56	24,5	51,5	-8,5	2,0	1,8	1,758	2,158
	57	17,0	59,0	-16	0,2	0,1	0,037	0,200
	58	17,0	59,0	-16	0,4	0,3	0,178	0,402
	59	17,0	59,0	-16	0,6	0,5	0,358	0,607
	60	17,0	59,0	-16	0,8	0,7	0,559	0,816
	61	17,0	59,0	-16	1,0	0,9	0,773	1,030
	62	17,0	59,0	-16	1,3	1,2	1,109	1,363
Poloha 12	63	17,0	59,0	-16	1,5	1,4	1,328	1,590
	64	17,0	59,0	-16	2,0	1,9	1,927	2,189
	65	8,5	67,5	-25	0,1	0,075	0,025	0,100
	66	8,5	67,5	-25	0,3	0,275	0,164	0,301
	67	8,5	67,5	-25	0,5	0,475	0,346	0,506
	68	8,5	67,5	-25	0,8	0,775	0,659	0,822
	69	8,5	67,5	-25	1,0	0,975	0,881	1,040
Poloha 13	70	8,5	67,5	-25	1,3	1,275	1,232	1,377
	71	8,5	67,5	-25	1,5	1,475	1,450	1,607
	72	8,5	67,5	-25	2,0	1,975	2,068	2,218
	73	0,0	76,0	-33	0,1	0,1	0,039	0,100
	74	0,0	76,0	-33	0,3	0,3	0,187	0,302
	75	0,0	76,0	-33	0,5	0,5	0,374	0,507
	76	0,0	76,0	-33	0,8	0,8	0,692	0,824
Poloha 14	77	0,0	76,0	-33	1,0	1,0	0,915	1,043
	78	0,0	76,0	-33	1,3	1,3	1,261	1,381
	79	0,0	76,0	-33	1,5	1,5	1,486	1,613
	80	0,0	76,0	-33	2,0	2,0	2,108	2,226
	81	-5,0	81	-38	0,1	0,1	0,039	0,100
	82	-5,0	81	-38	0,3	0,3	0,187	0,302
	83	-5,0	81	-38	0,5	0,5	0,374	0,507
Poloha 14	84	-5,0	81	-38	0,8	0,8	0,691	0,824
	85	-5,0	81	-38	1,0	1,0	0,914	1,043
	86	-5,0	81	-38	1,3	1,3	1,259	1,381
	87	-5,0	81	-38	1,5	1,5	1,484	1,612
	88	-5,0	81	-38	2,0	2,0	2,104	2,226

Příloha H – Vyhodnocené výsledky.

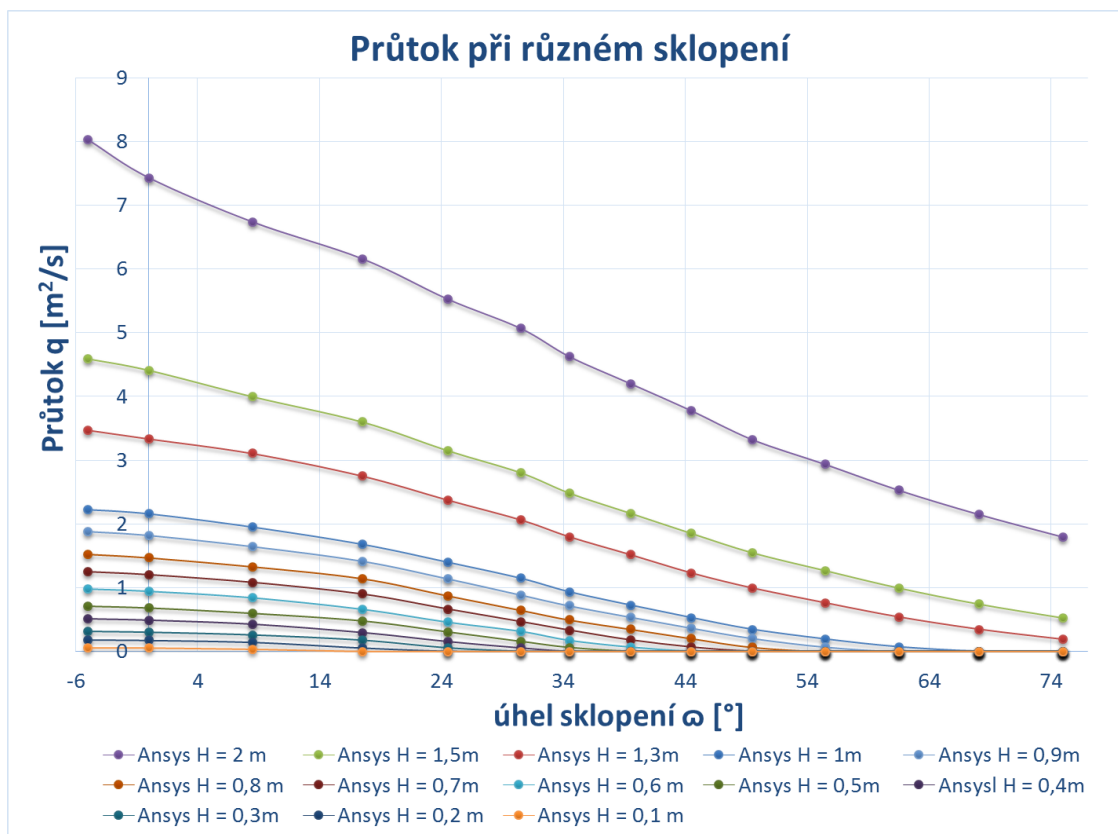
	Horní voda H [m]	Energ. výška Ho [m]	Průtok q [m ² /s]	Rychlost v [m/s]	Síla F _h [kN/m]	Moment M _h [kNm/m]	Rameno r _h [m]	Síla F _{hx} [kN/m]	Síla F _{hz} [kN/m]	Rameno r _{hx} [m]	Rameno r _{hz} [m]	Přep. Souč. μ	Moment M _{hg} [kNm/m]	Úhel α [°]	Úhel ω [°]
Poloha 1	1,10	1,100	0,000	0,00	6,525	2,695	0,413	5,94	-2,71	0,392	0,137	0,714	3,448	43,0	76,0
	1,30	1,301	0,187	0,93	8,970	4,148	0,462	7,96	-3,88	0,440	0,160	0,701	4,901	43,0	76,0
	1,50	1,502	0,527	1,32	11,221	5,465	0,487	9,91	-4,98	0,462	0,174	0,700	6,218	43,0	76,0
	2,00	2,017	1,797	2,00	16,472	8,405	0,510	14,48	-7,46	0,482	0,187	0,693	9,159	43,0	76,0
Poloha 2	1,00	1,000	0,001	0,00	5,919	2,408	0,407	4,92	-3,13	0,368	0,183	0,708	3,290	35,1	68,1
	1,30	1,301	0,346	1,15	9,356	4,462	0,477	7,63	-5,21	0,425	0,229	0,709	5,344	35,1	68,1
	1,50	1,504	0,744	1,49	11,474	5,668	0,494	9,32	-6,46	0,439	0,241	0,704	6,550	35,1	68,1
	2,00	2,024	2,150	2,15	16,428	8,365	0,509	13,29	-9,35	0,450	0,251	0,703	9,246	35,1	68,1
Poloha 3	0,90	0,900	0,000	0,00	5,111	2,058	0,403	3,97	-3,22	0,336	0,225	-	3,039	28,2	61,2
	1,00	1,003	0,070	0,70	6,372	2,804	0,440	4,80	-4,06	0,368	0,251	0,721	3,784	28,2	61,2
	1,30	1,302	0,540	1,35	9,659	4,707	0,487	7,15	-6,31	0,402	0,286	0,716	5,687	28,2	61,2
	1,50	1,507	0,998	1,66	11,656	5,811	0,499	8,59	-7,67	0,410	0,295	0,714	6,791	28,2	61,2
Poloha 4	2,00	2,033	2,532	2,30	16,285	8,250	0,507	11,98	-10,77	0,415	0,301	0,711	9,230	28,2	61,2
	0,80	0,800	0,000	0,00	4,428	1,755	0,396	3,14	-3,12	0,306	0,255	-	2,809	22,1	55,1
	0,90	0,904	0,072	0,72	5,692	2,506	0,440	3,87	-4,06	0,340	0,288	0,731	3,561	22,1	55,1
	1,00	1,000	0,193	0,96	6,805	3,157	0,464	4,58	-4,90	0,355	0,308	0,727	4,212	22,1	55,1
Poloha 5	1,30	1,305	0,761	1,52	9,875	4,877	0,494	6,56	-7,22	0,373	0,333	0,719	5,932	22,1	55,1
	1,50	1,511	1,269	1,81	11,723	5,865	0,500	7,77	-8,59	0,377	0,338	0,716	6,919	22,1	55,1
	2,00	2,044	2,935	2,45	15,998	8,040	0,503	10,60	-11,75	0,379	0,340	0,716	9,095	22,1	55,1
	0,70	0,700	0,000	0,00	3,757	1,463	0,390	2,40	-2,89	0,275	0,278	-	2,575	16,7	49,7
Poloha 5	0,80	0,802	0,068	0,68	4,991	2,190	0,439	3,05	-3,85	0,310	0,318	0,708	3,301	16,7	49,7
	1,00	1,001	0,346	1,15	7,131	3,415	0,479	4,26	-5,60	0,332	0,353	0,708	4,527	16,7	49,7
	1,30	1,308	0,994	1,66	9,966	4,954	0,497	5,90	-7,88	0,342	0,369	0,710	6,065	16,7	49,7
	1,50	1,517	1,550	1,94	11,682	5,838	0,500	6,91	-9,25	0,344	0,372	0,711	6,950	16,7	49,7
Poloha 5	2,00	2,057	3,324	2,56	15,566	7,731	0,497	9,24	-12,34	0,343	0,370	0,712	8,843	16,7	49,7

	Horní voda H [m]	Energ. výška Ho [m]	Průtok q [m ² /s]	Rychlost v [m/s]	Síla F _h [kN/m]	Moment M _h [kNm/m]	Rameno r _h [m]	Síla F _{hx} [kN/m]	Síla F _{hz} [kN/m]	Rameno r _{hx} [m]	Rameno r _{hz} [m]	Přep. Souč. μ	Moment M _{hg} [kNm/m]	Úhel α [°]	Úhel ω [°]
Poloha 6	0,60	0,600	0,000	0,00	3,095	1,182	0,382	1,77	-2,54	0,245	0,295	-	2,339	11,5	44,5
	0,70	0,702	0,067	0,67	4,325	1,896	0,438	2,32	-3,56	0,280	0,344	0,698	3,053	11,5	44,5
	0,85	0,851	0,260	1,04	5,898	2,793	0,474	3,10	-4,92	0,297	0,377	0,700	3,950	11,5	44,5
	1,00	1,003	0,530	1,32	7,433	3,638	0,489	3,86	-6,23	0,300	0,387	0,702	4,795	11,5	44,5
	1,30	1,307	1,230	1,76	9,948	4,947	0,497	5,15	-8,37	0,307	0,399	0,701	6,104	11,5	44,5
	1,50	1,525	1,854	2,06	11,507	5,722	0,497	5,96	-9,69	0,308	0,400	0,706	6,879	11,5	44,5
	2,00	2,073	3,778	2,70	14,993	7,353	0,490	7,82	-12,61	0,305	0,393	0,716	8,510	11,5	44,5
Poloha 7	0,50	0,500	0,000	0,00	2,436	0,888	0,365	1,23	-2,11	0,209	0,300	-	2,080	6,5	39,5
	0,60	0,602	0,065	0,65	3,630	1,585	0,437	1,68	-3,14	0,248	0,365	0,672	2,776	6,5	39,5
	0,70	0,700	0,179	0,89	4,667	2,174	0,466	2,11	-4,08	0,260	0,394	0,675	3,365	6,5	39,5
	0,85	0,852	0,421	1,20	6,113	2,966	0,485	2,73	-5,37	0,267	0,412	0,681	4,157	6,5	39,5
	1,00	1,006	0,727	1,45	7,437	3,665	0,493	3,30	-6,55	0,270	0,420	0,685	4,856	6,5	39,5
	1,30	1,319	1,518	1,90	9,764	4,833	0,495	4,33	-8,63	0,271	0,423	0,693	6,024	6,5	39,5
	1,50	1,534	2,169	2,17	11,156	5,494	0,492	4,97	-9,86	0,270	0,421	0,699	6,685	6,5	39,5
	2,00	2,090	4,202	2,80	14,176	6,809	0,480	6,40	-12,54	0,267	0,410	0,710	8,001	6,5	39,5
Poloha 8	0,40	0,400	0,000	0,00	1,786	0,606	0,340	0,78	-1,60	0,172	0,294	-	1,822	1,7	34,7
	0,50	0,501	0,060	0,60	2,943	1,277	0,434	1,15	-2,65	0,216	0,382	0,635	2,493	1,7	34,7
	0,60	0,600	0,170	0,85	3,949	1,840	0,466	1,49	-3,58	0,226	0,414	0,641	3,056	1,7	34,7
	0,80	0,803	0,496	1,24	5,767	2,817	0,488	2,13	-5,27	0,233	0,437	0,657	4,033	1,7	34,7
	1,00	1,009	0,935	1,56	7,369	3,636	0,493	2,72	-6,75	0,234	0,442	0,666	4,852	1,7	34,7
	1,30	1,327	1,798	2,00	9,430	4,626	0,491	3,49	-8,65	0,234	0,440	0,682	5,842	1,7	34,7
	1,50	1,544	2,485	2,26	10,651	5,179	0,486	3,96	-9,76	0,233	0,436	0,688	6,395	1,7	34,7
	2,00	2,109	4,625	2,89	13,248	6,255	0,472	5,01	-12,08	0,229	0,422	0,701	7,472	1,7	34,7

	Horní voda H [m]	Energ. výška Ho [m]	Průtok q [m ² /s]	Rychlost v [m/s]	Síla F _h [kN/m]	Moment M _h [kNm/m]	Rameno r _h [m]	Síla F _{rx} [kN/m]	Síla F _{rz} [kN/m]	Rameno r _{rx} [m]	Rameno r _{rz} [m]	Přep. Souč. μ	Moment M _{hg} [kNm/m]	Úhel α [°]	Úhel ω [°]
Poloha 9	0,30	0,300	0,000	0,00	1,150	0,328	0,285	0,44	-1,06	0,126	0,256	-	1,560	-2,9	30,1
	0,40	0,400	0,053	0,53	2,262	0,965	0,427	0,72	-2,09	0,183	0,391	0,571	2,197	-2,9	30,1
	0,50	0,500	0,156	0,78	3,230	1,500	0,465	0,98	-3,01	0,192	0,430	0,589	2,732	-2,9	30,1
	0,70	0,703	0,467	1,17	4,971	2,423	0,487	1,47	-4,67	0,197	0,453	0,618	3,654	-2,9	30,1
	1,00	1,014	1,148	1,64	7,154	3,508	0,490	2,11	-6,74	0,198	0,457	0,644	4,740	-2,9	30,1
	1,30	1,336	2,064	2,06	8,926	4,310	0,483	2,67	-8,43	0,197	0,451	0,663	5,541	-2,9	30,1
	1,50	1,557	2,805	2,34	9,960	4,744	0,476	3,01	-9,42	0,196	0,445	0,674	5,975	-2,9	30,1
	2,00	2,130	5,067	2,98	11,990	5,623	0,469	3,72	-11,26	0,192	0,426	0,693	6,855	-2,9	30,1
Poloha 10	0,20	0,200	0,000	0,00	0,624	0,146	0,234	0,20	-0,59	0,085	0,218	-	1,386	-8,5	24,5
	0,30	0,301	0,054	0,54	1,630	0,687	0,422	0,37	-1,54	0,143	0,402	0,567	1,927	-8,5	24,5
	0,40	0,400	0,154	0,77	2,519	1,168	0,464	0,53	-2,41	0,149	0,446	0,579	2,408	-8,5	24,5
	0,60	0,603	0,457	1,14	4,140	2,012	0,486	0,84	-3,99	0,152	0,469	0,604	3,252	-8,5	24,5
	0,80	0,810	0,875	1,46	5,530	2,703	0,489	1,12	-5,33	0,152	0,472	0,622	3,943	-8,5	24,5
	1,00	1,021	1,402	1,75	6,699	3,246	0,485	1,37	-6,46	0,152	0,468	0,638	4,486	-8,5	24,5
	1,30	1,348	2,375	2,16	8,173	3,879	0,475	1,71	-7,87	0,151	0,458	0,654	5,119	-8,5	24,5
	1,50	1,572	3,153	2,43	8,955	4,177	0,466	1,91	-8,61	0,151	0,450	0,664	5,417	-8,5	24,5
Poloha 11	2,00	2,158	5,528	3,07	10,141	4,550	0,449	2,30	-9,73	0,148	0,422	0,683	5,790	-8,5	24,5
	0,10	0,100	0,000	0,00	0,218	0,035	0,161	0,05	-0,21	0,042	0,156	-	1,268	-16,0	17,0
	0,20	0,201	0,053	0,53	1,025	0,430	0,420	0,11	-0,99	0,090	0,418	0,560	1,663	-16,0	17,0
	0,40	0,406	0,295	0,98	2,536	1,205	0,475	0,20	-2,48	0,090	0,477	0,592	2,438	-16,0	17,0
	0,60	0,609	0,660	1,32	3,810	1,878	0,493	0,30	-3,73	0,090	0,482	0,615	3,110	-16,0	17,0
	0,80	0,823	1,143	1,63	4,899	2,390	0,488	0,40	-4,81	0,090	0,477	0,630	3,623	-16,0	17,0
	1,00	1,021	1,682	1,87	5,686	2,675	0,470	0,48	-5,62	0,091	0,470	0,645	3,908	-16,0	17,0
	1,30	1,360	2,752	2,29	6,691	3,108	0,464	0,62	-6,58	0,091	0,454	0,659	4,340	-16,0	17,0
	1,50	1,590	3,601	2,57	7,109	3,214	0,452	0,70	-6,99	0,092	0,441	0,671	4,447	-16,0	17,0
	2,00	2,189	6,160	3,24	7,303	2,990	0,409	0,88	-7,18	0,092	0,398	0,691	4,222	-16,0	17,0

	Horní voda H [m]	Energ. výška Ho [m]	Průtok q [m ² /s]	Rychlost v [m/s]	Síla F _h [kN/m]	Moment M _h [kNm/m]	Rameno r _h [m]	Síla F _{hx} [kN/m]	Síla F _{hz} [kN/m]	Rameno r _{hx} [m]	Rameno r _{hz} [m]	Přep. Souč. μ	Moment M _{hig} [kNm/m]	Úhel α [°]	Úhel ω [°]
Poloha 12	0,025	0,025	0,000	0,00	0,028	0,002	0,085	0,00	0,03	0,011	0,084	-	1,201	-24,5	8,5
	0,10	0,101	0,035	0,47	0,456	0,195	0,427	-0,01	-0,42	0,053	0,410	0,567	1,394	-24,5	8,5
	0,30	0,303	0,256	0,93	1,631	0,781	0,479	-0,09	-1,58	0,077	0,469	0,592	1,980	-24,5	8,5
	0,50	0,506	0,597	1,26	2,652	1,269	0,478	-0,15	-2,59	0,077	0,469	0,605	2,467	-24,5	8,5
	0,80	0,822	1,328	1,71	3,868	1,812	0,468	-0,21	-3,79	0,074	0,460	0,632	3,010	-24,5	8,5
	1,00	1,040	1,953	2,00	4,380	2,004	0,458	-0,21	-4,30	0,070	0,450	0,647	3,203	-24,5	8,5
	1,30	1,377	3,106	2,44	4,655	2,015	0,433	-0,16	-4,58	0,060	0,427	0,669	3,214	-24,5	8,5
	1,50	1,607	3,998	2,71	4,568	1,872	0,410	-0,11	-4,50	0,052	0,405	0,680	3,071	-24,5	8,5
	2,00	2,218	6,736	3,41	3,180	0,875	0,275	0,15	-3,15	0,042	0,270	0,702	2,074	-24,5	8,5
	0,00	0,000	0,000	0,00	0,000	0,000	0,000	0,00	0,00	0,000	0,000	-	1,139	-33,0	0,0
Poloha 13	0,10	0,100	0,055	0,55	0,379	0,169	0,447	-0,06	-0,34	0,027	0,434	0,592	1,308	-33,0	0,0
	0,30	0,302	0,299	1,00	1,258	0,576	0,458	-0,23	-1,19	0,039	0,452	0,610	1,715	-33,0	0,0
	0,50	0,507	0,681	1,36	2,027	0,920	0,454	-0,38	-1,94	0,039	0,449	0,639	2,059	-33,0	0,0
	0,80	0,824	1,468	1,83	2,717	1,202	0,442	-0,49	-2,62	0,036	0,438	0,664	2,340	-33,0	0,0
	1,00	1,043	2,162	2,16	2,782	1,176	0,423	-0,48	-2,70	0,030	0,425	0,687	2,314	-33,0	0,0
	1,30	1,366	3,336	2,57	2,291	0,833	0,363	-0,32	-2,23	0,025	0,360	0,708	1,971	-33,0	0,0
	1,50	1,615	4,411	2,94	1,367	0,284	0,208	-0,07	-1,36	0,008	0,204	0,728	1,423	-33,0	0,0
	2,00	2,228	7,429	3,71	-1,982	-1,597	0,805	0,78	1,84	0,228	0,750	0,756	-0,458	-33,0	0,0
	0,00	0,000	0,000	0,00	0,000	0,000	0,000	0,00	0,00	0,000	0,000	-	1,092	-38,0	-5,0
	0,10	0,101	0,059	0,59	0,301	0,129	0,429	-0,06	-0,27	0,052	0,410	0,626	1,221	-38,0	-5,0
Poloha 14	0,30	0,301	0,312	1,04	1,046	0,457	0,437	-0,26	-0,98	0,068	0,427	0,639	1,549	-38,0	-5,0
	0,50	0,507	0,709	1,42	1,654	0,721	0,435	-0,43	-1,56	0,070	0,426	0,665	1,812	-38,0	-5,0
	0,80	0,824	1,524	1,90	1,997	0,838	0,419	-0,50	-1,89	0,063	0,412	0,689	1,929	-38,0	-5,0
	1,00	1,043	2,228	2,23	1,781	0,685	0,384	-0,41	-1,70	0,050	0,378	0,709	1,776	-38,0	-5,0
	1,30	1,373	3,473	2,67	0,786	0,111	0,141	-0,06	-0,78	0,010	0,135	0,731	1,203	-38,0	-5,0
	1,50	1,615	4,593	3,06	-0,582	-0,620	1,065	0,38	0,49	0,485	0,858	0,758	0,471	-38,0	-5,0
	2,00	2,240	8,025	4,01	-5,658	-3,294	0,582	1,99	5,23	0,129	0,563	0,811	-2,202	-38,0	-5,0

Příloha I – Graf závislosti specifických průtoků na úhlu sklopení klapky.



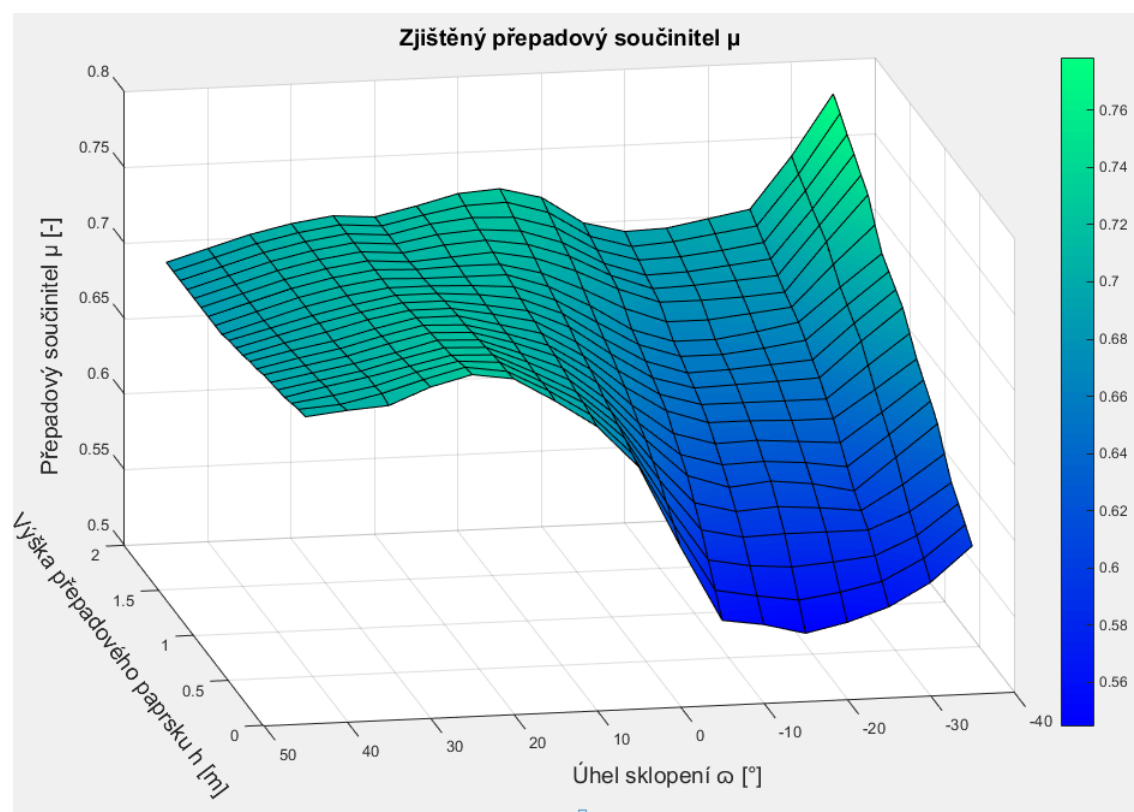
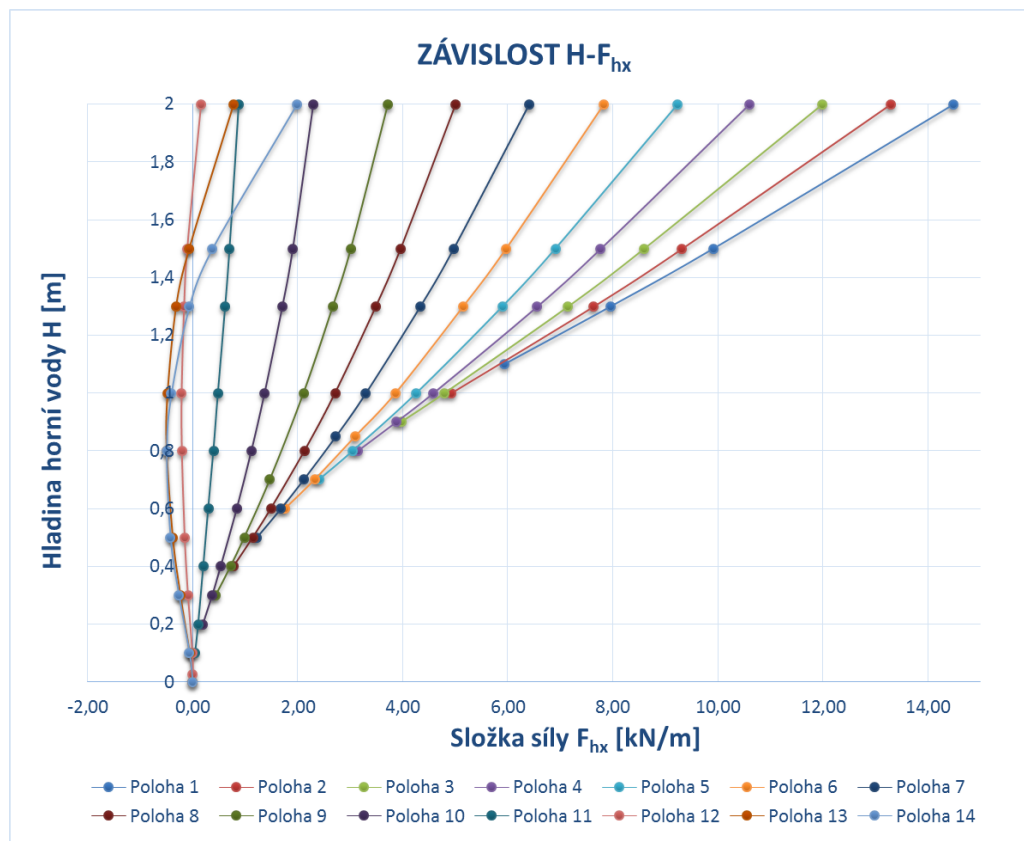
Příloha J – Zjištěné specifické průtoky.

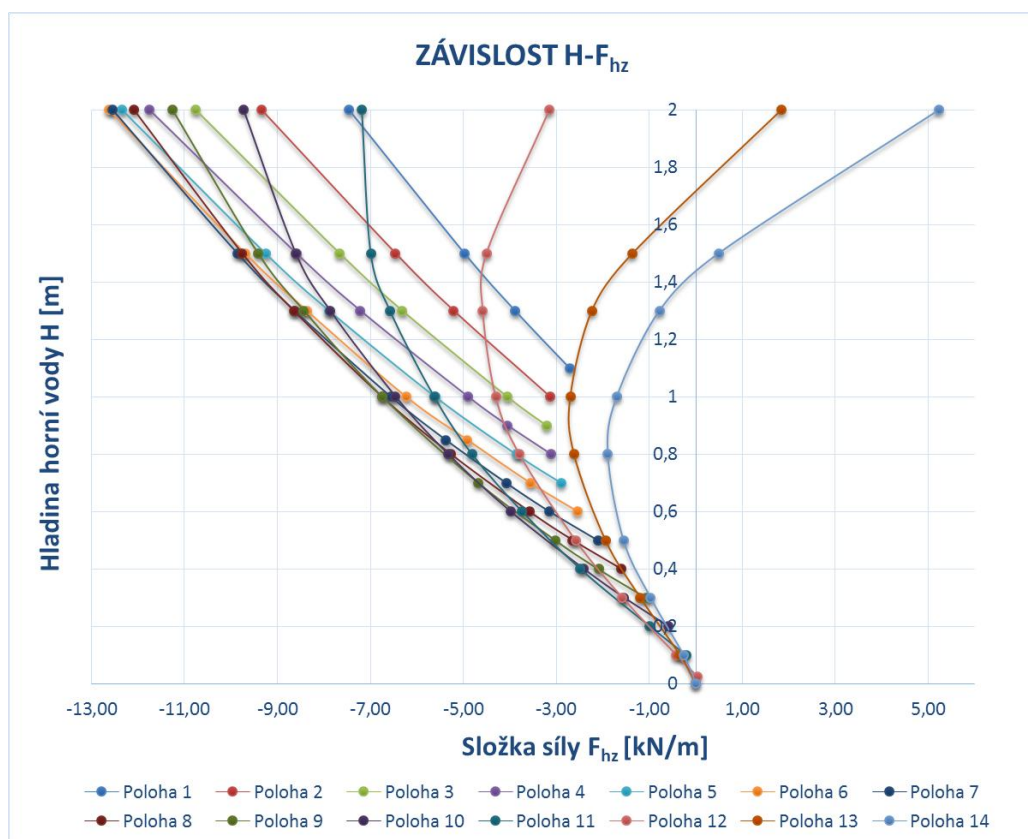
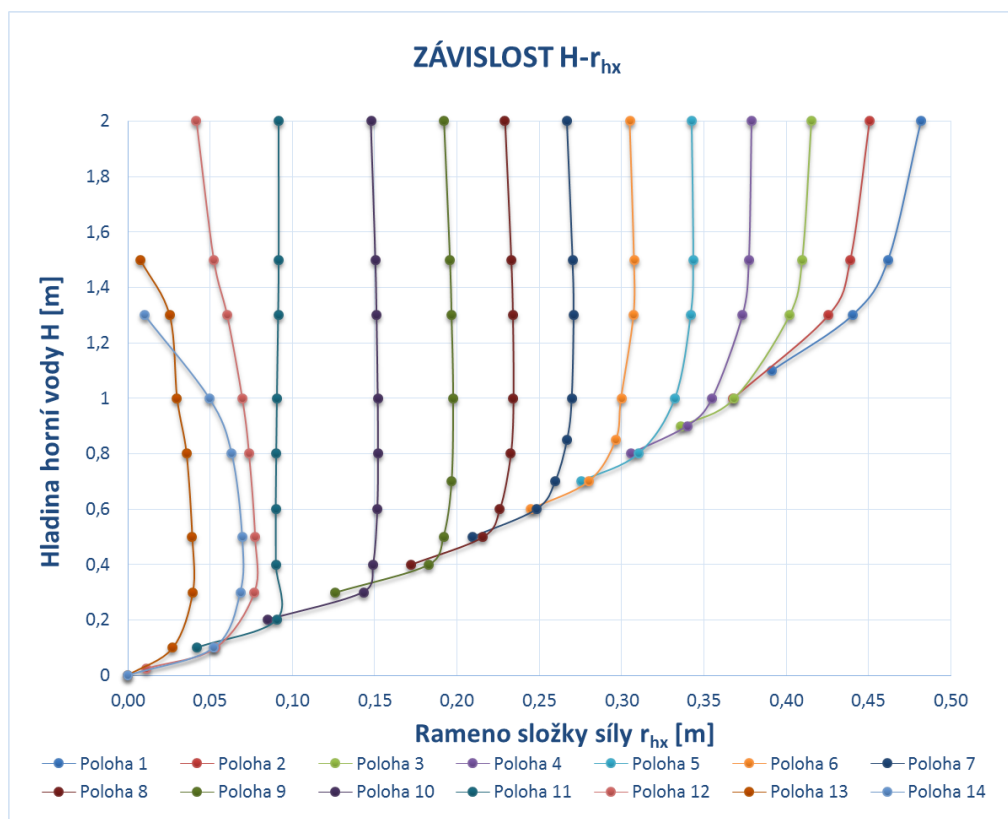
Specifické průtoky q [m ² /s]															
H\ω	75	68,1	61,5	55,5	49,5	44,5	39,5	34,5	30,5	24,5	17,5	8,5	0	-5	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,035	0,055	0,059	
0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,053	0,146	0,177	0,186	
0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,054	0,174	0,256	0,299	0,312	
0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0,053	0,154	0,295	0,426	0,490	0,511	
0,5	0	0	0	0	0	0	0	0,060	0,156	0,305	0,478	0,597	0,681	0,709	
0,6	0	0	0	0	0	0	0,065	0,170	0,312	0,457	0,660	0,841	0,943	0,981	
0,7	0	0	0	0	0	0,067	0,179	0,333	0,467	0,666	0,901	1,085	1,206	1,252	
0,8	0	0	0	0	0,068	0,205	0,350	0,496	0,648	0,875	1,143	1,328	1,468	1,524	
0,9	0	0	0	0,072	0,207	0,367	0,539	0,716	0,885	1,138	1,412	1,641	1,815	1,876	
1	0	0,001	0,070	0,193	0,346	0,530	0,727	0,935	1,148	1,402	1,682	1,953	2,162	2,228	
1,3	0,187	0,346	0,540	0,761	0,994	1,230	1,518	1,798	2,064	2,375	2,752	3,106	3,336	3,473	
1,5	0,527	0,744	0,998	1,269	1,550	1,854	2,169	2,485	2,805	3,153	3,601	3,998	4,411	4,593	
2	1,797	2,150	2,532	2,935	3,324	3,778	4,202	4,625	5,067	5,528	6,160	6,736	7,429	8,025	

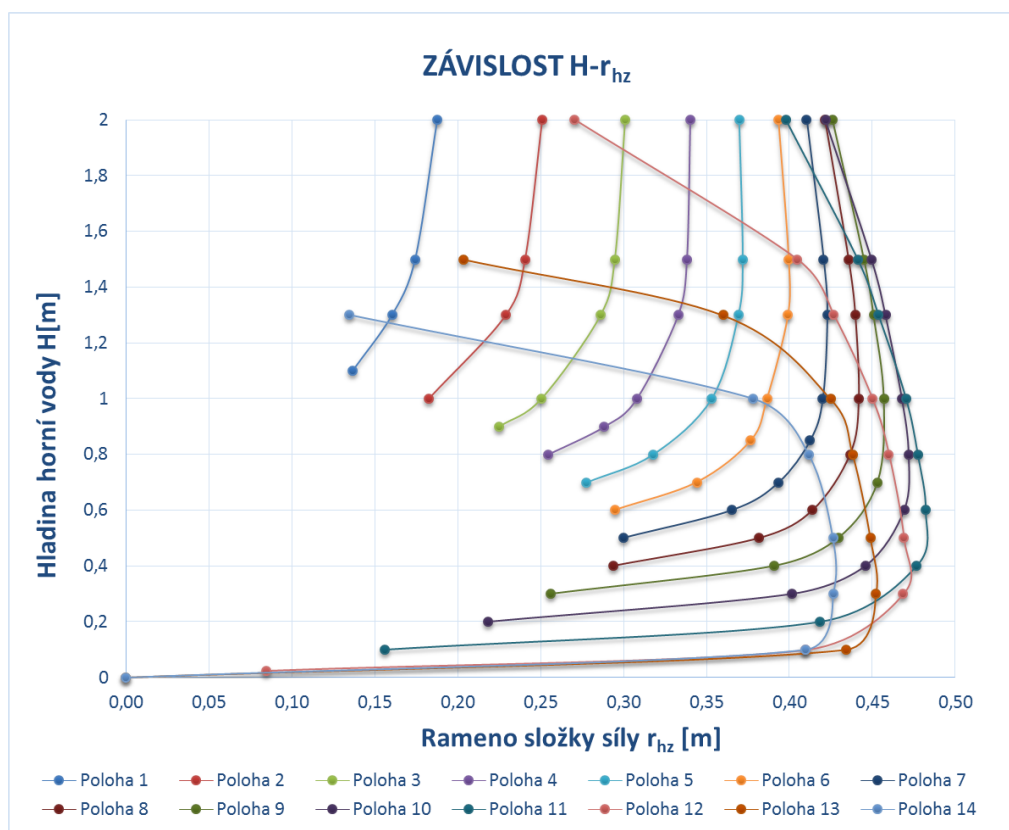
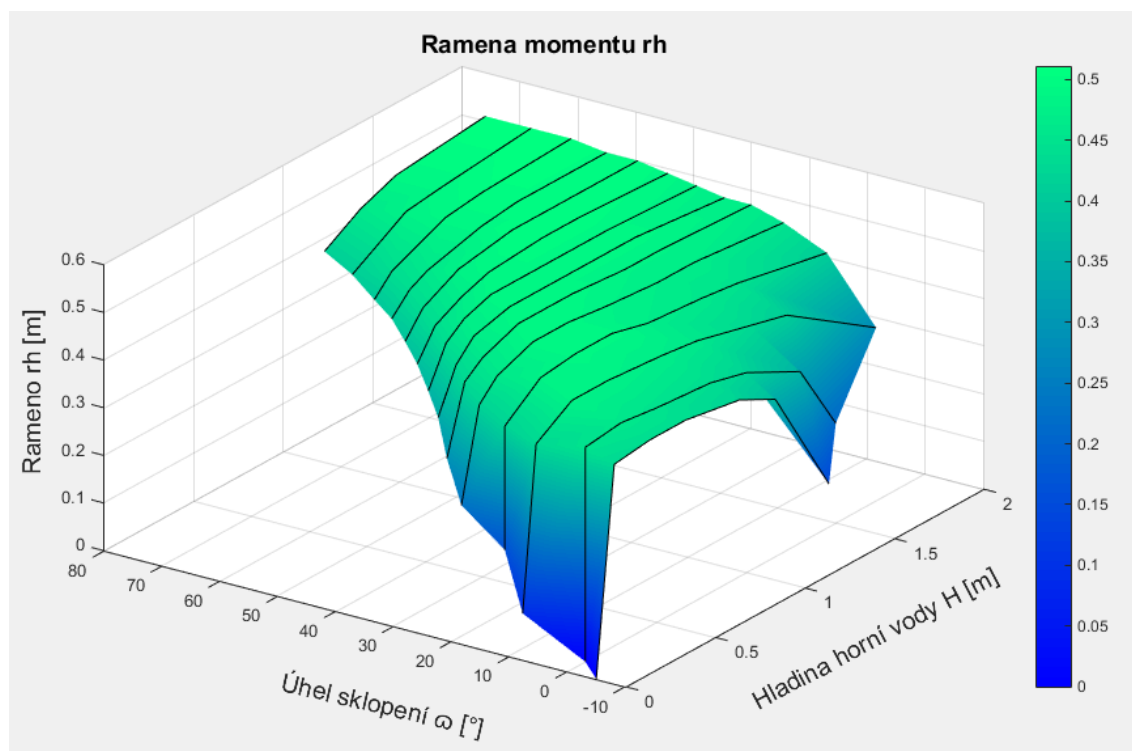
Příloha K – Zjištěné přepadové součinitele μ .

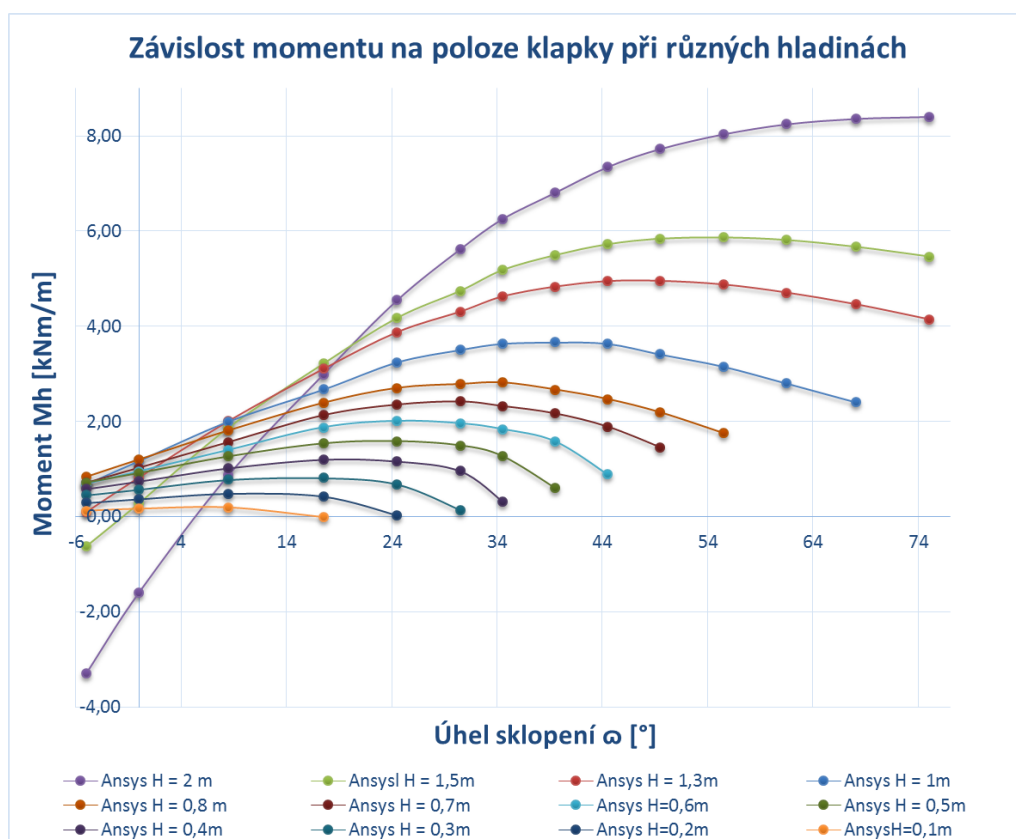
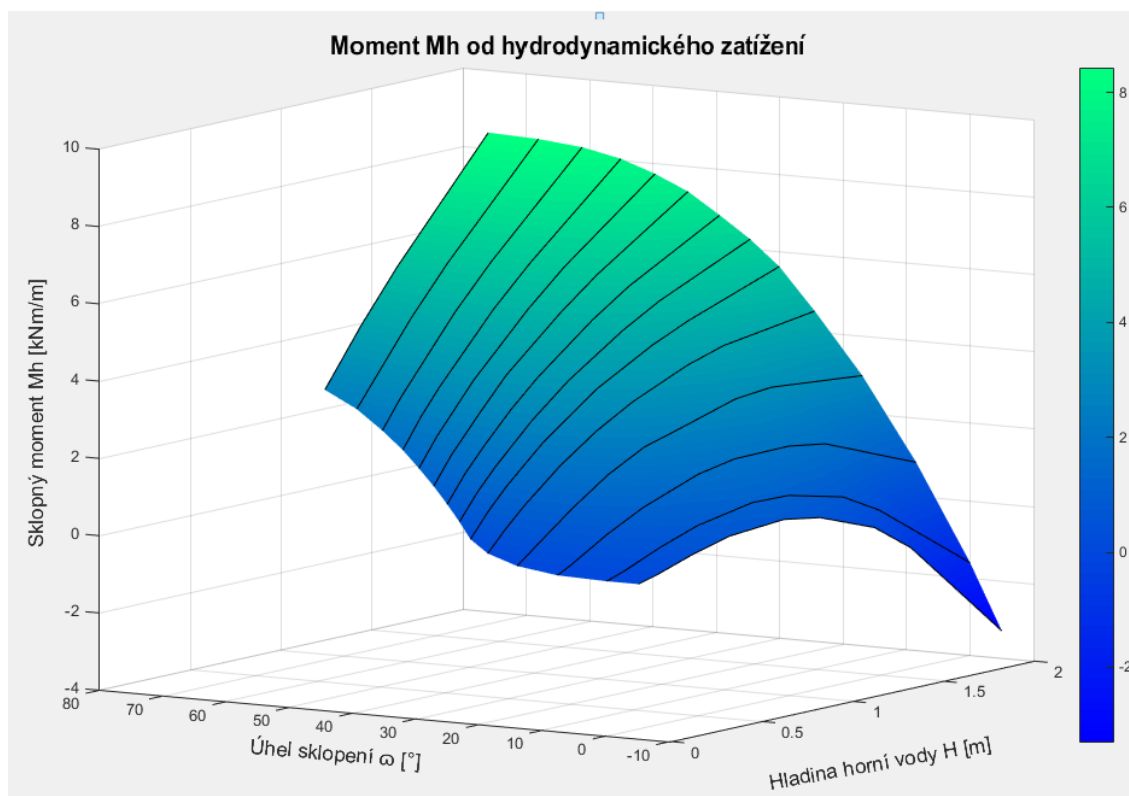
μ	$(h/R) \backslash \omega$	78	73	68	63	58	53	48	43	38	33	28	23	18	13	8	3	-2
h [m]	$(h/R) \backslash \alpha$	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35
0	0,00	0,703	0,706	0,708	0,719	0,726	0,722	0,706	0,688	0,660	0,606	0,556	0,552	0,545	0,551	0,560	0,575	0,598
0,1	0,04	0,702	0,704	0,710	0,718	0,725	0,721	0,707	0,690	0,663	0,615	0,570	0,565	0,561	0,565	0,571	0,585	0,606
0,2	0,09	0,700	0,704	0,709	0,717	0,723	0,721	0,707	0,692	0,667	0,623	0,584	0,579	0,577	0,579	0,582	0,594	0,614
0,3	0,13	0,698	0,704	0,709	0,715	0,721	0,720	0,707	0,693	0,670	0,632	0,598	0,592	0,593	0,593	0,593	0,604	0,622
0,4	0,18	0,697	0,702	0,707	0,714	0,720	0,719	0,708	0,695	0,673	0,639	0,610	0,603	0,605	0,603	0,600	0,616	0,635
0,5	0,22	0,696	0,701	0,706	0,712	0,719	0,718	0,708	0,697	0,676	0,647	0,622	0,613	0,616	0,613	0,607	0,628	0,649
0,6	0,27	0,695	0,700	0,705	0,712	0,718	0,717	0,709	0,699	0,680	0,652	0,630	0,622	0,623	0,621	0,617	0,637	0,658
0,7	0,31	0,693	0,699	0,704	0,711	0,717	0,716	0,709	0,700	0,683	0,658	0,638	0,630	0,631	0,629	0,627	0,646	0,666
0,8	0,36	0,692	0,698	0,703	0,710	0,716	0,716	0,709	0,702	0,686	0,664	0,647	0,638	0,638	0,637	0,637	0,655	0,674
0,9	0,40	0,690	0,697	0,703	0,710	0,715	0,715	0,710	0,704	0,689	0,669	0,652	0,644	0,644	0,644	0,644	0,665	0,685
1	0,44	0,689	0,696	0,703	0,709	0,714	0,714	0,710	0,705	0,693	0,674	0,657	0,649	0,650	0,651	0,652	0,675	0,696
1,1	0,49	0,688	0,695	0,702	0,708	0,713	0,713	0,711	0,707	0,696	0,678	0,662	0,653	0,654	0,656	0,658	0,681	0,702
1,2	0,53	0,686	0,694	0,702	0,708	0,712	0,712	0,711	0,709	0,699	0,683	0,667	0,658	0,658	0,661	0,665	0,687	0,708
1,3	0,58	-	-	-	-	-	0,711	0,711	0,711	0,702	0,688	0,671	0,662	0,662	0,666	0,671	0,693	0,714
1,4	0,62	-	-	-	-	-	0,711	0,712	0,712	0,705	0,693	0,679	0,669	0,669	0,672	0,675	0,702	0,727
1,5	0,67	-	-	-	-	-	0,710	0,712	0,714	0,709	0,699	0,686	0,676	0,676	0,677	0,679	0,711	0,741
1,6	0,71	-	-	-	-	-	-	0,714	0,716	0,712	0,703	0,689	0,679	0,680	0,682	0,684	0,716	0,748
1,7	0,76	-	-	-	-	-	-	0,715	0,717	0,715	0,706	0,691	0,682	0,683	0,686	0,689	0,721	0,756
1,8	0,80	-	-	-	-	-	-	0,716	0,719	0,718	0,710	0,694	0,686	0,687	0,690	0,694	0,727	0,763
1,9	0,84	-	-	-	-	-	-	-	0,721	0,722	0,714	0,697	0,689	0,691	0,695	0,699	0,732	0,771
2	0,89	-	-	-	-	-	-	-	0,723	0,725	0,718	0,700	0,693	0,694	0,699	0,704	0,738	0,778

Příloha L – 3D graf zjištěného přepadového součinitele.

Příloha M – Grafy složek síly F_h ve směrech X a Z.

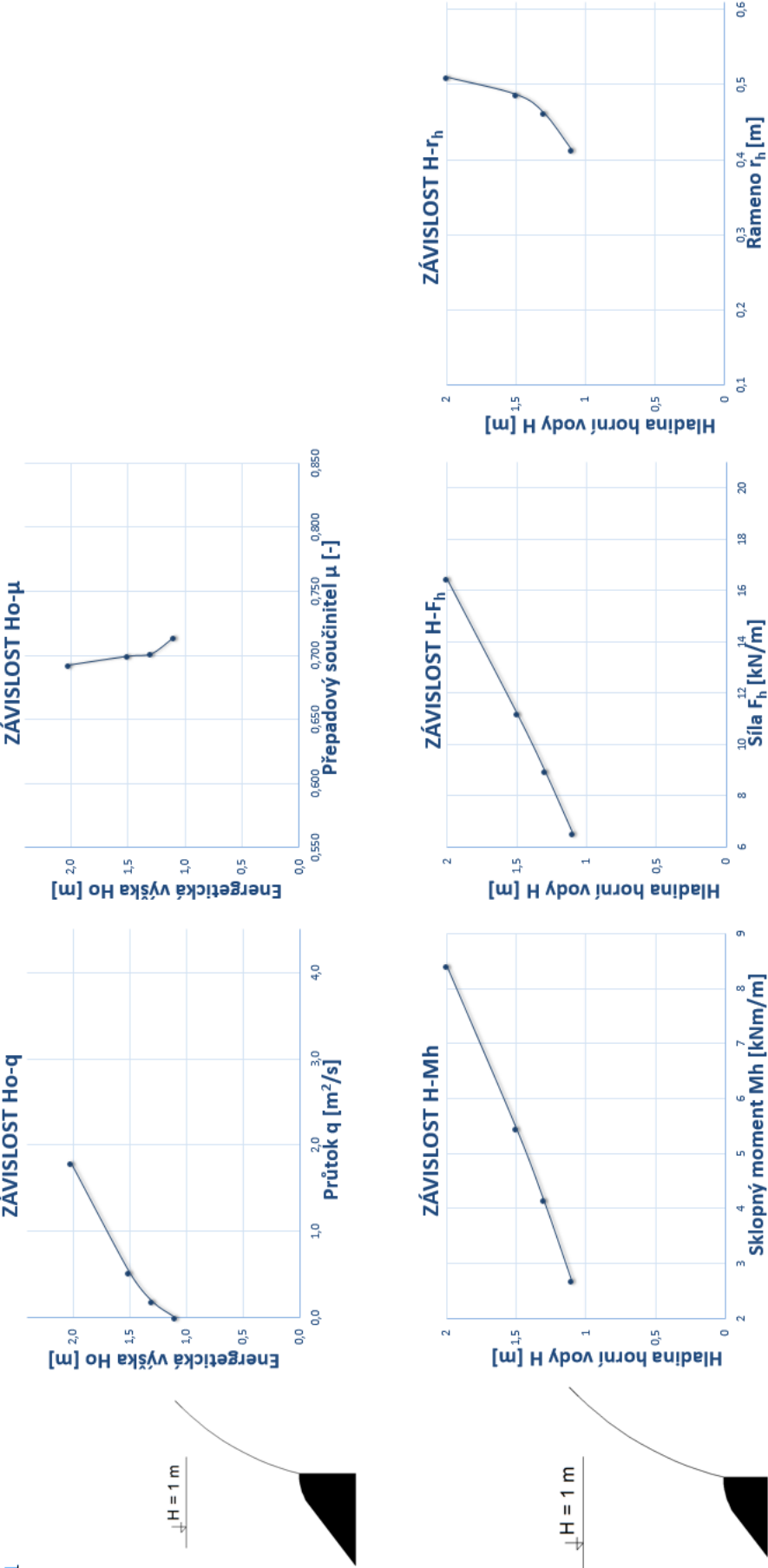
Příloha N – Ramena směrových složek síly F_h od osy otáčení klapky

Příloha O – 3D graf ramen r_h .

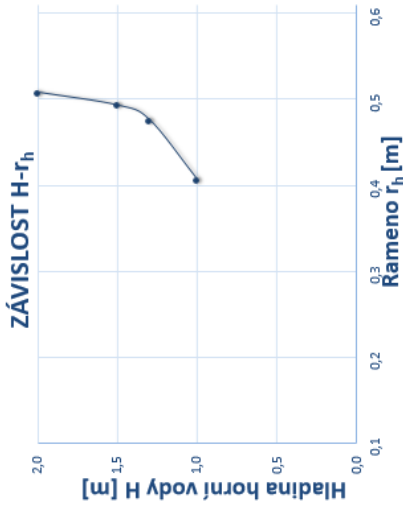
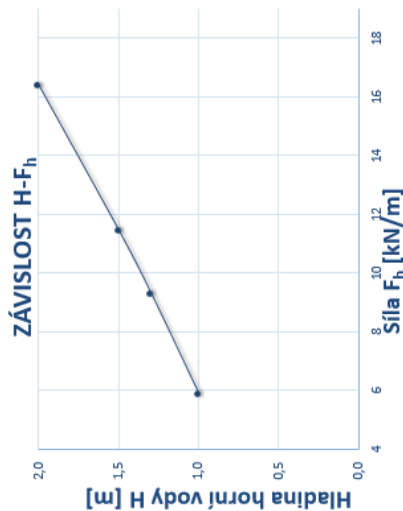
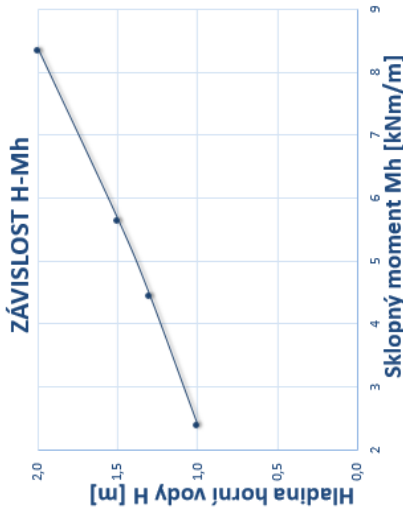
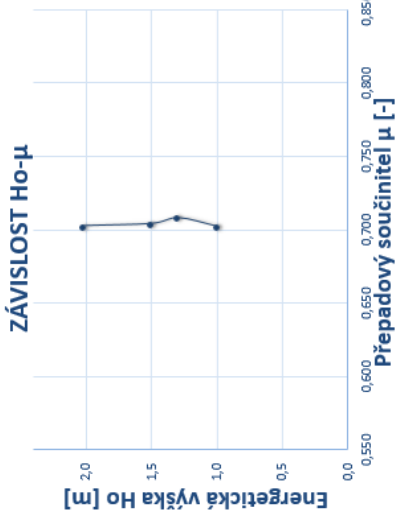
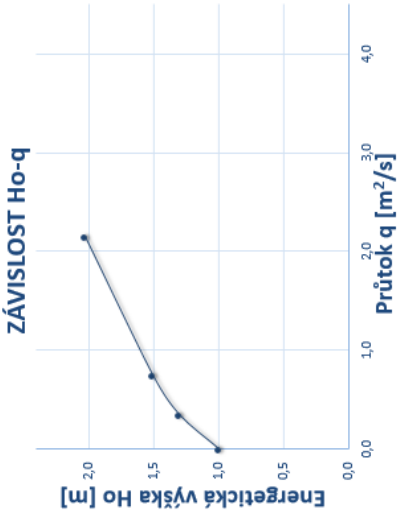
Příloha P – Graf závislosti hydrodynamického momentu na úhlu sklopení klapky.**Příloha Q** – 3D graf momentu M_h .

Příloha R – Grafické shrnutí zjištěných veličin pro 14 poloh klapky modelu.

Poloha 1
 $\omega = 76^\circ$



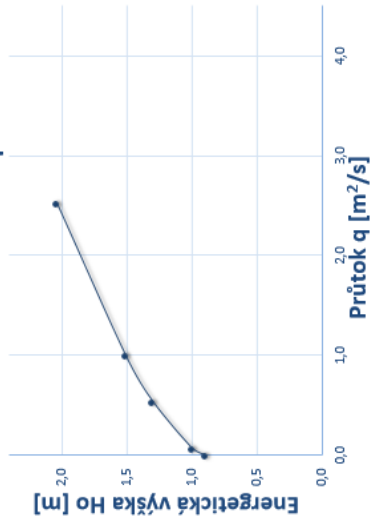
Poloha 2
 $\omega = 68,1^\circ$



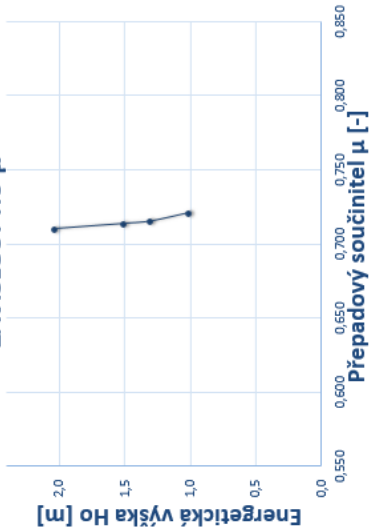
Poloha 3
 $\omega = 61,2^\circ$

$H = 1\text{ m}$

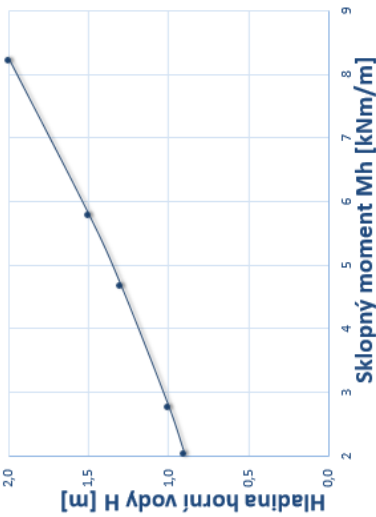
ZÁVISLOST H_0-q



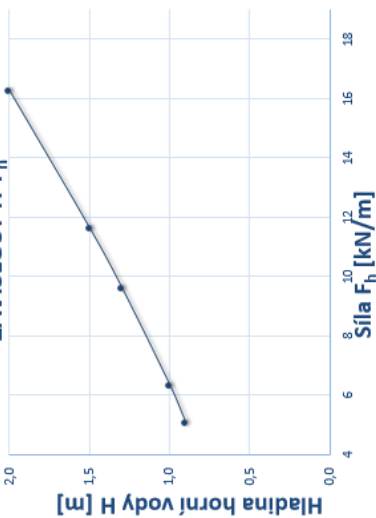
ZÁVISLOST $H_0-\mu$



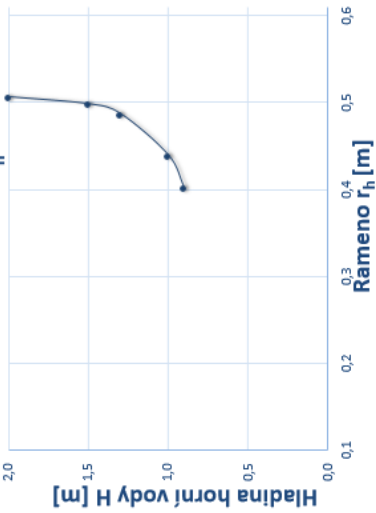
ZÁVISLOST $H-M_h$



ZÁVISLOST $H-F_h$

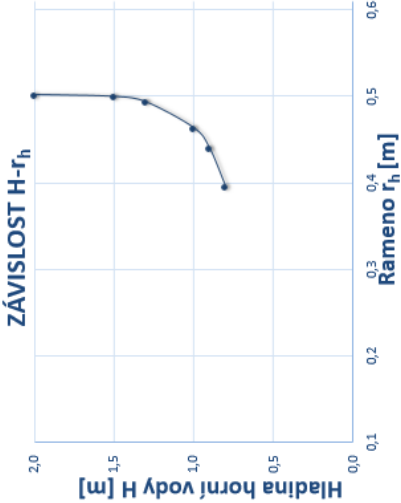
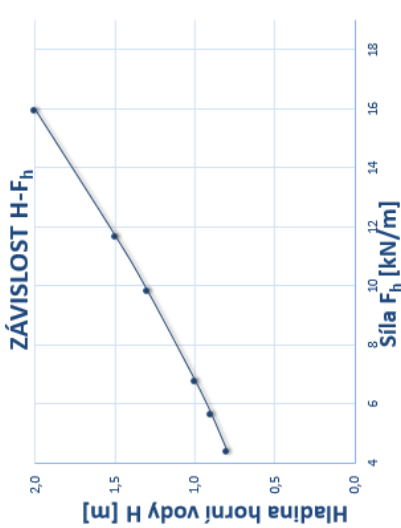
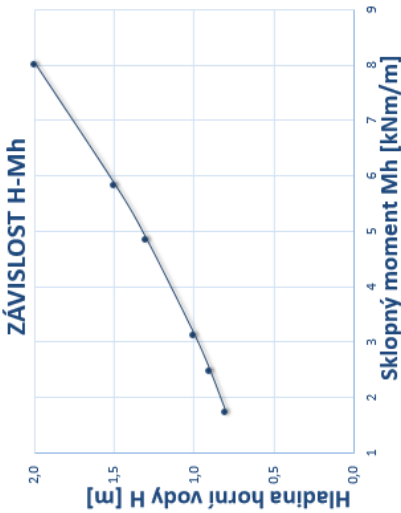
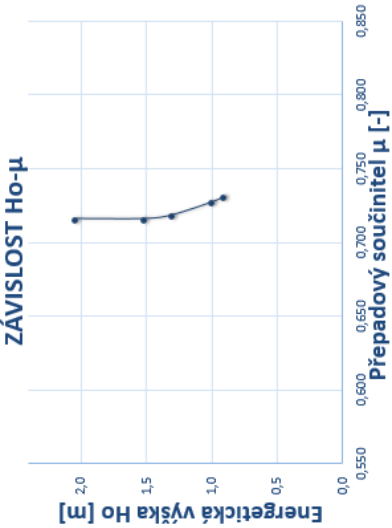
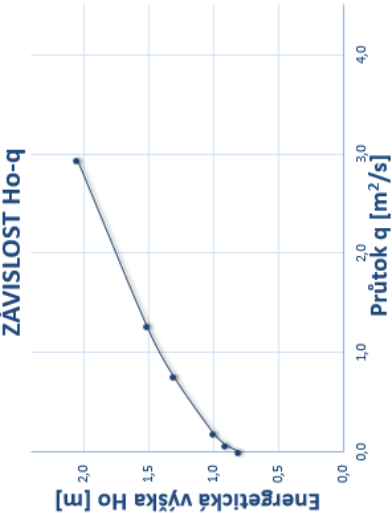


ZÁVISLOST $H-r_h$



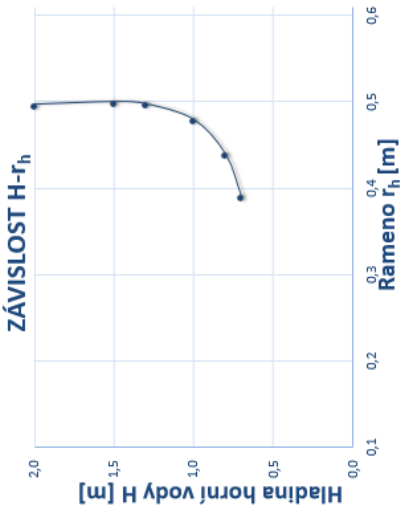
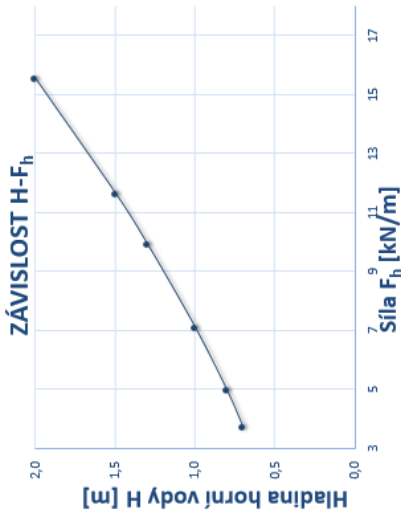
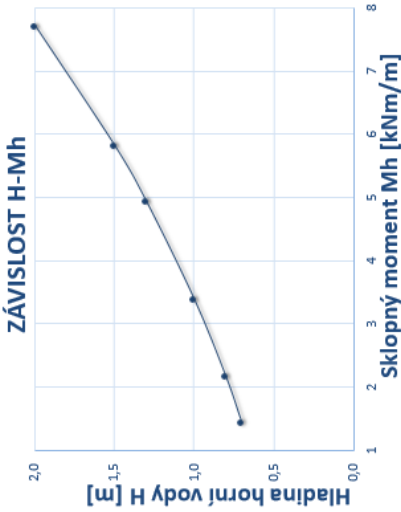
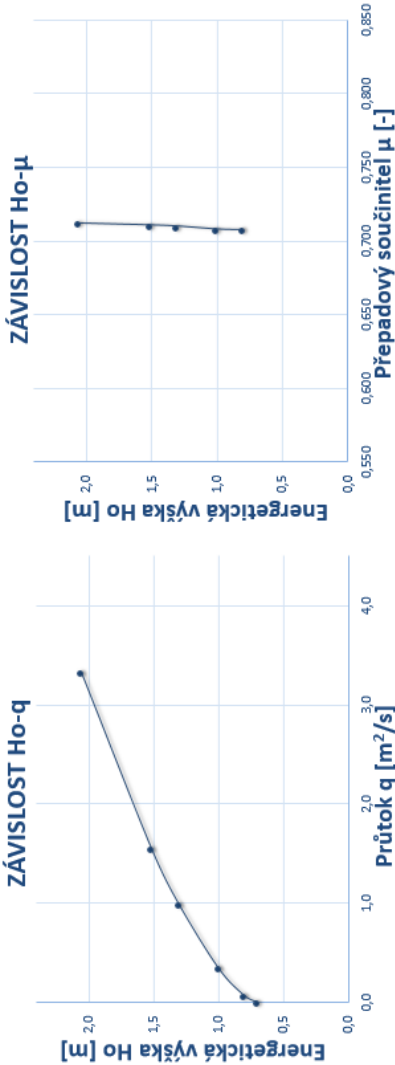
Poloha 4
 $\omega = 55,1^\circ$

$H = 1\text{ m}$



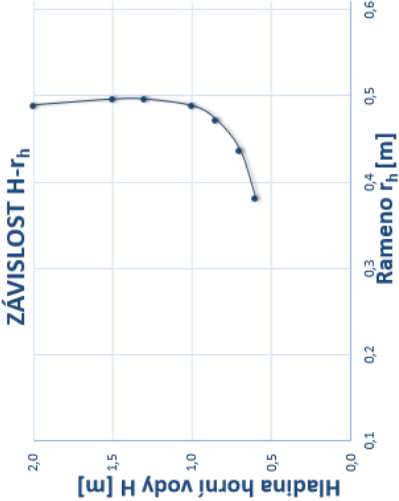
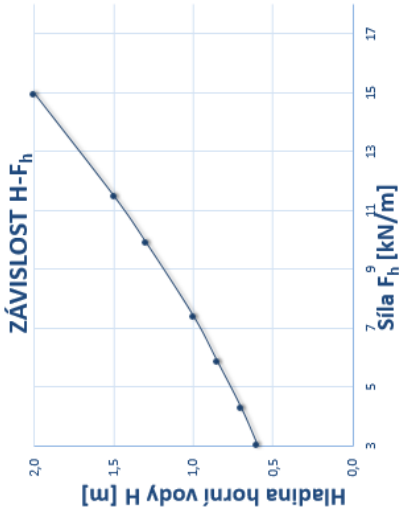
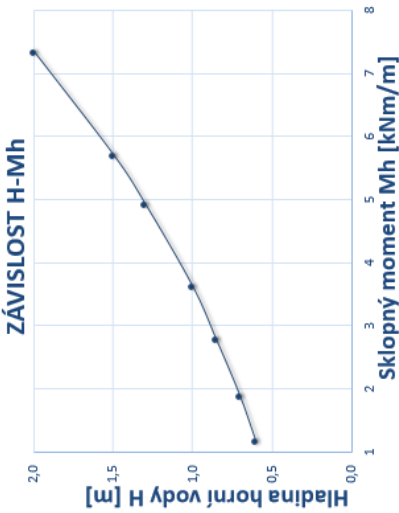
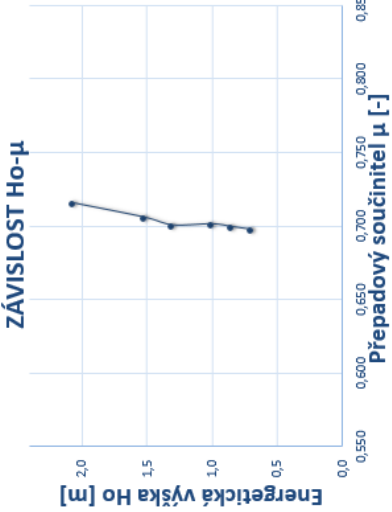
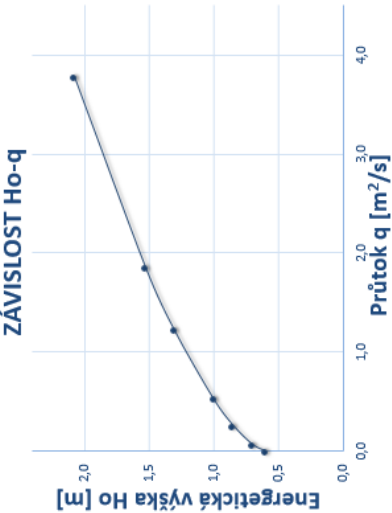
Poloha 5
 $\alpha = 49,7^\circ$

$H = 1\text{ m}$



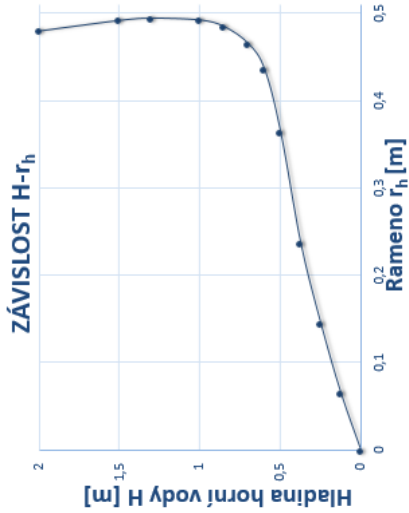
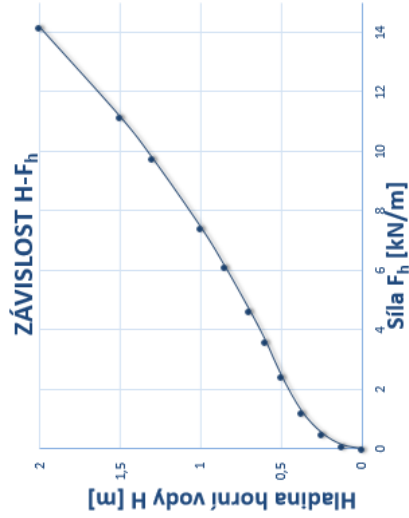
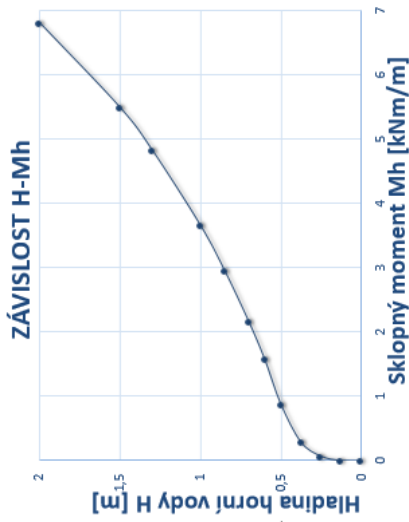
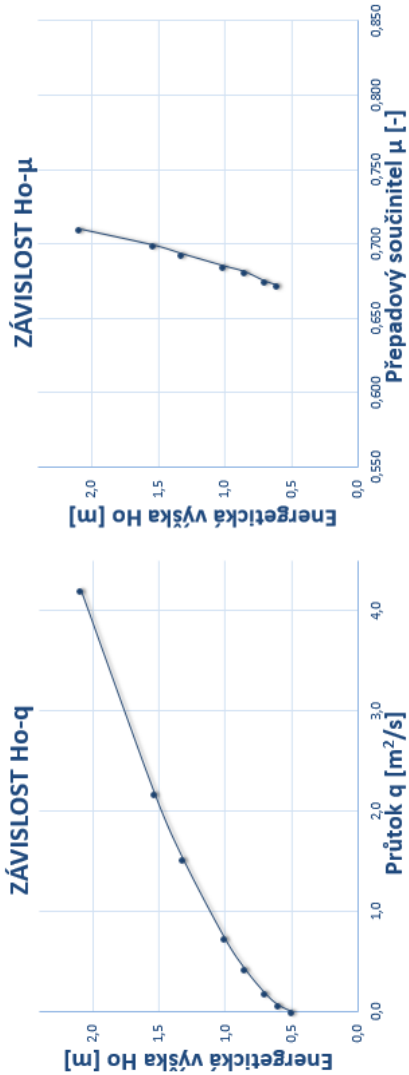
Poloha 6
 $\omega = 44,5^\circ$

$H = 1\text{ m}$

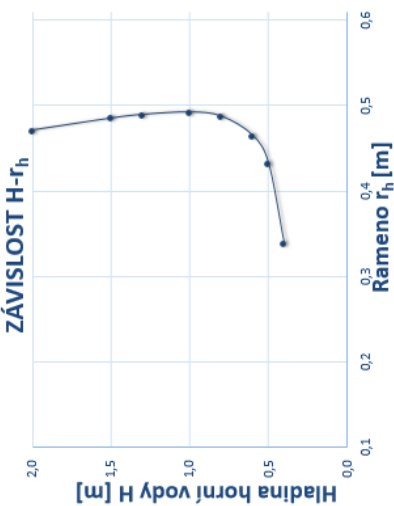
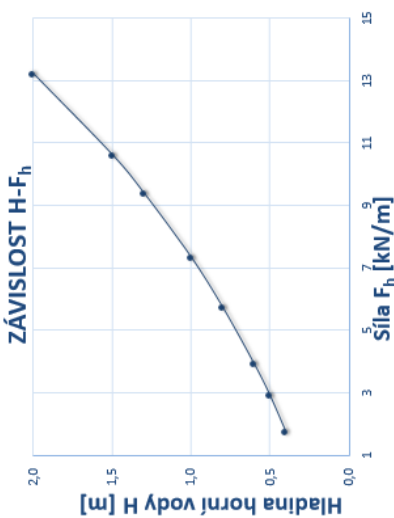
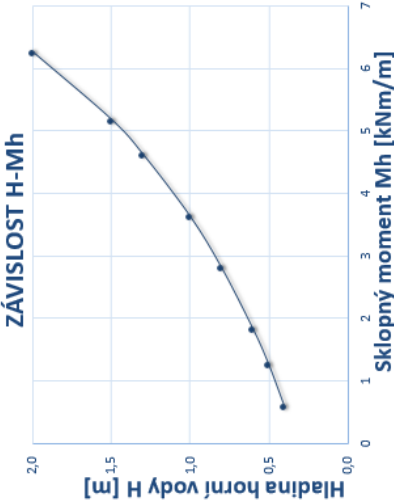
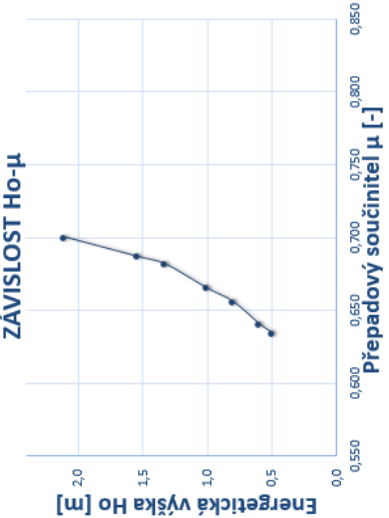
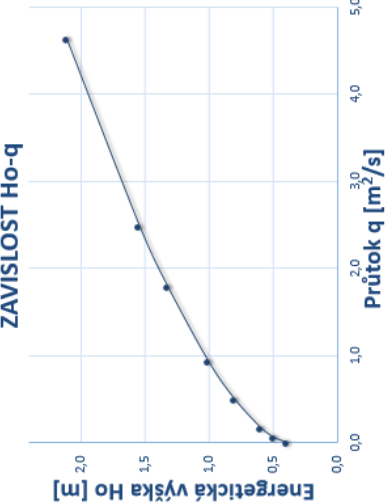


Poloha 7
 $\omega = 39,5^\circ$

$H = 1\text{ m}$

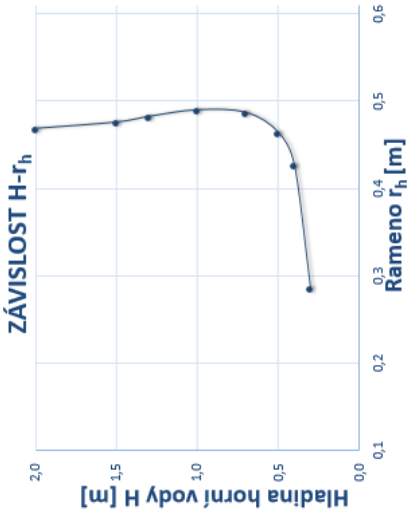
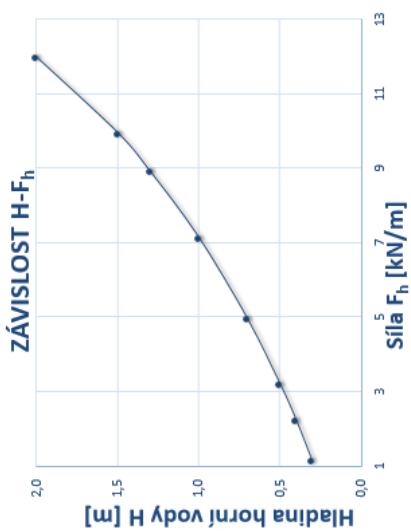
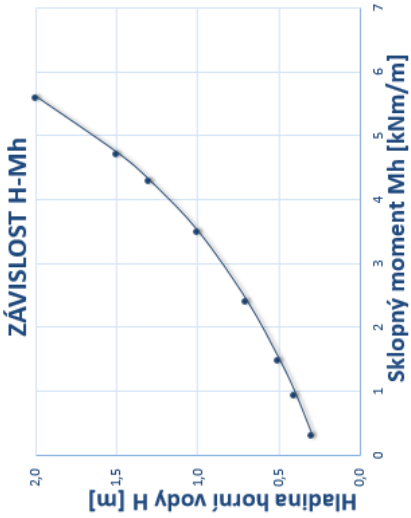
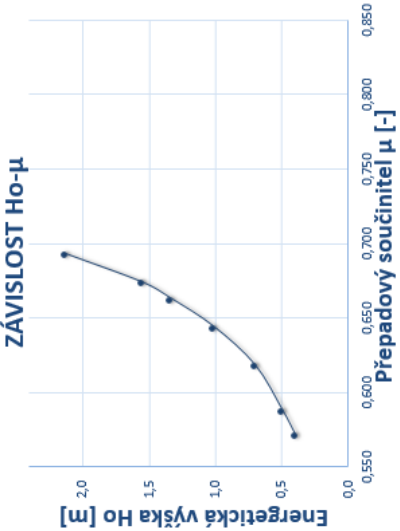
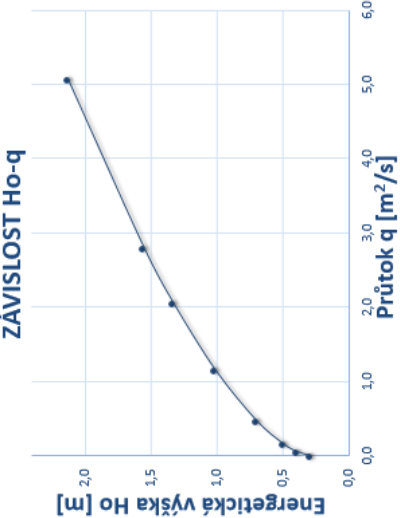


Poloha 8
 $\omega = 34,7^\circ$



Poloha 9
 $\Omega = 30,1^\circ$

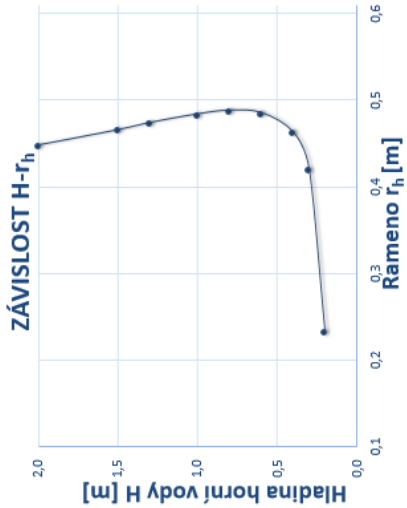
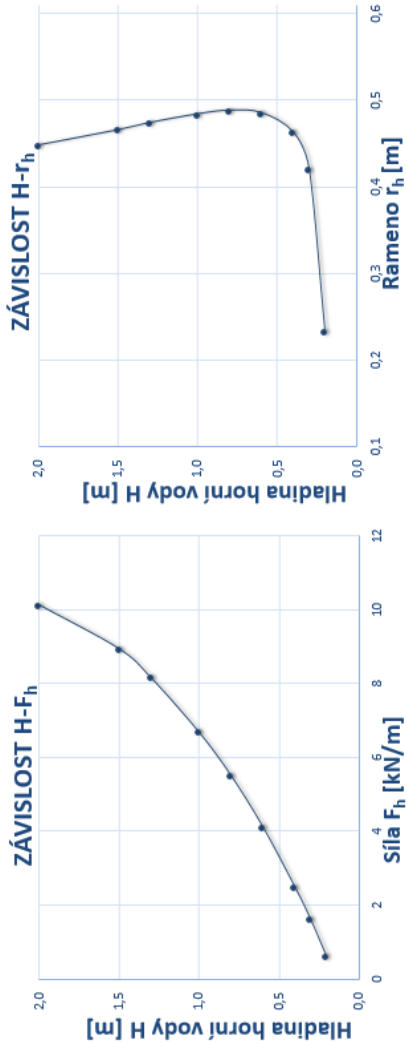
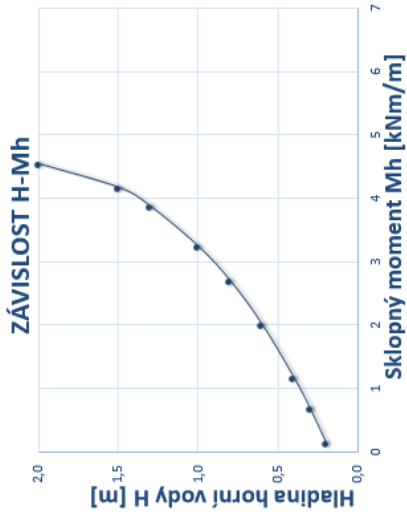
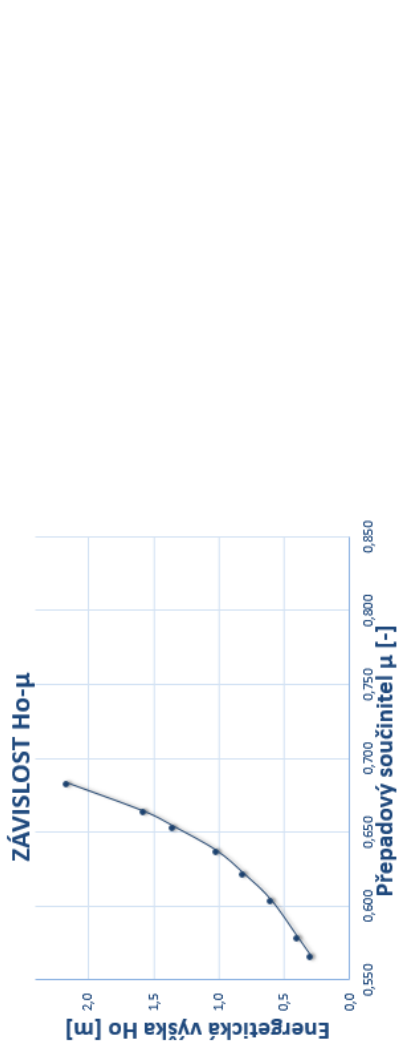
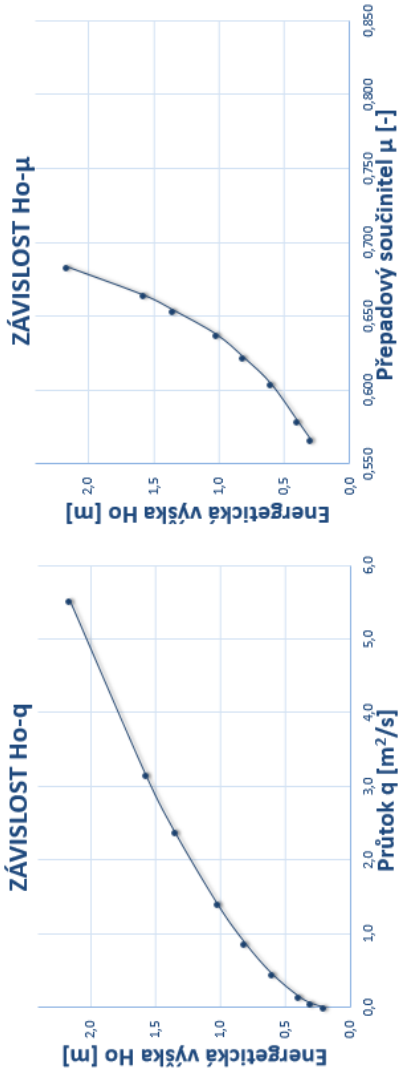
$H = 1\text{ m}$



Poloha 10

$\omega = 24,5^\circ$

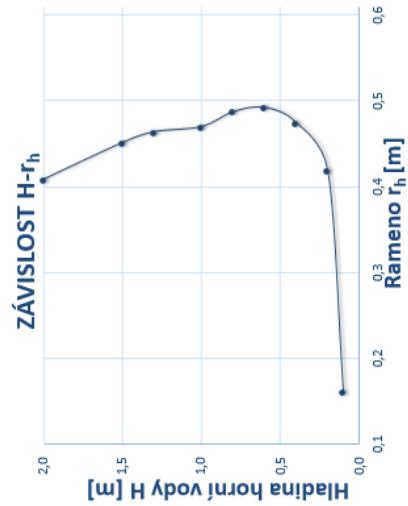
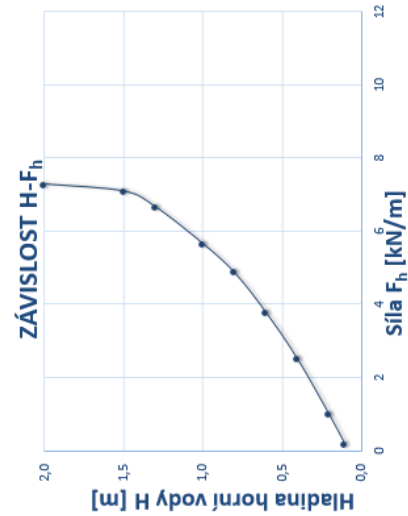
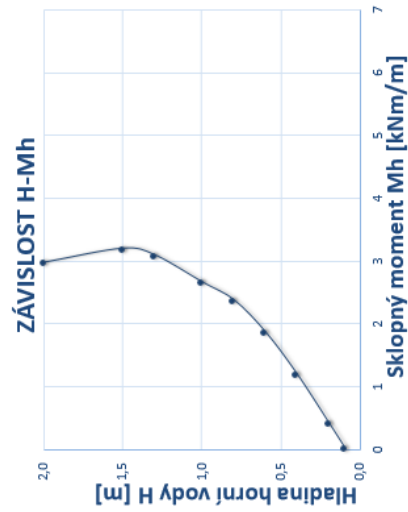
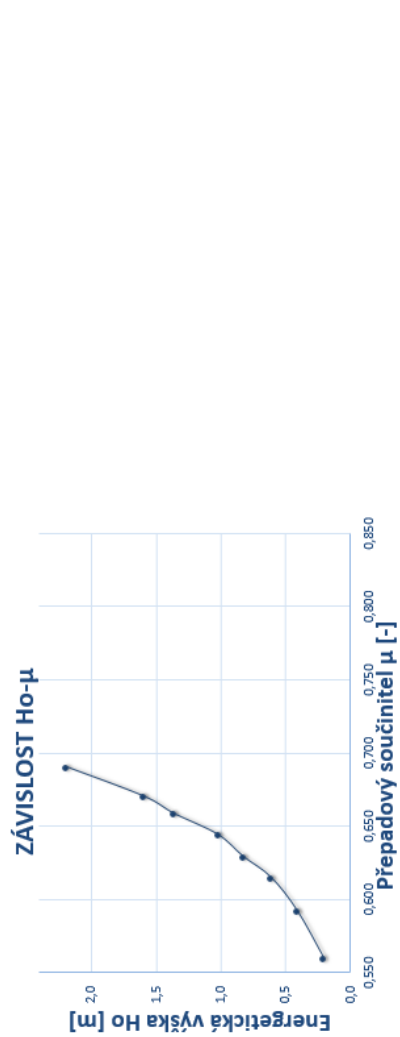
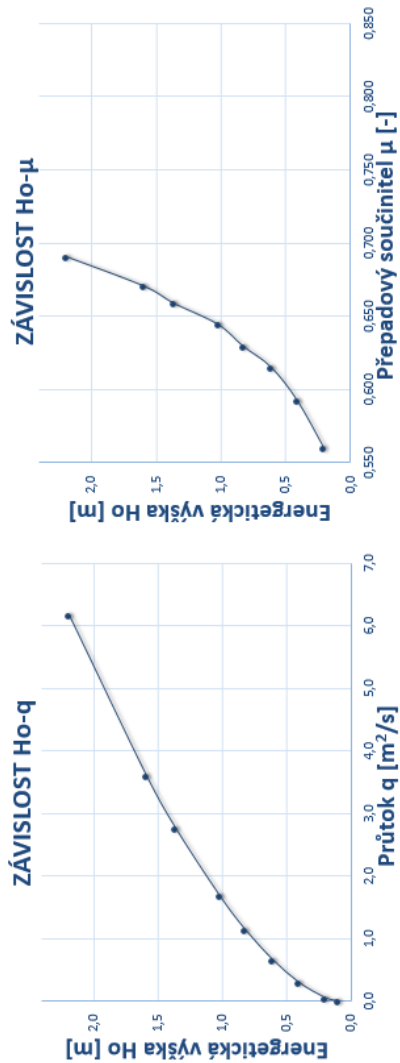
$H = 1\text{ m}$



Poloha 11

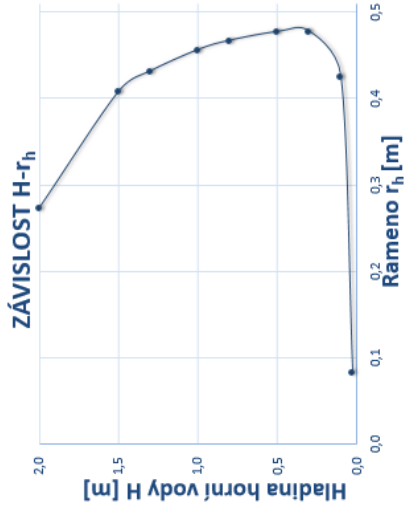
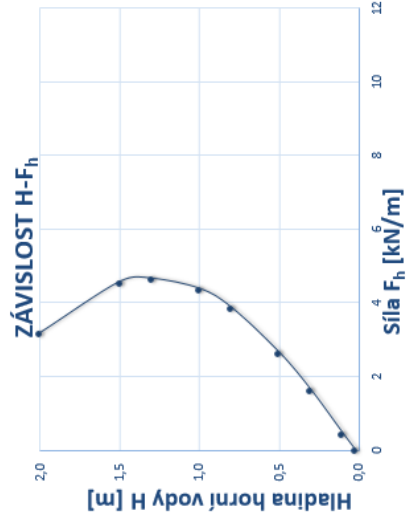
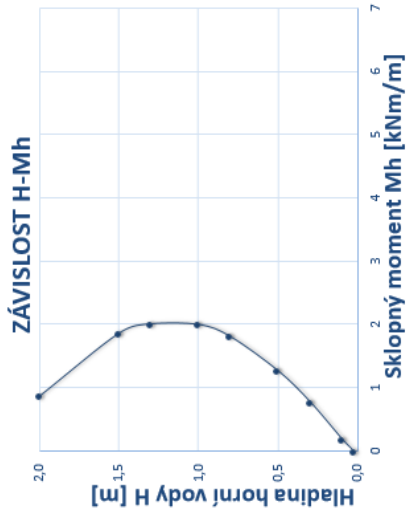
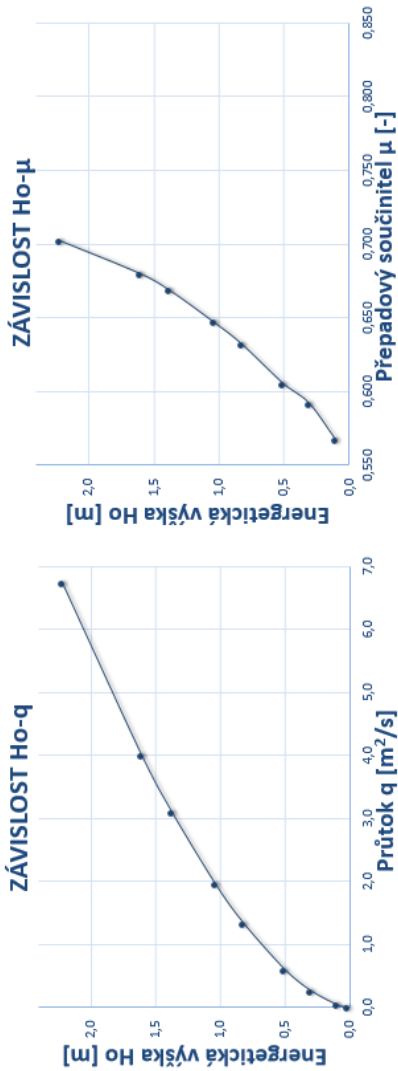
$\omega = 17^\circ$

$H = 1\text{ m}$



Poloha 12
 $\omega = 8,5^\circ$

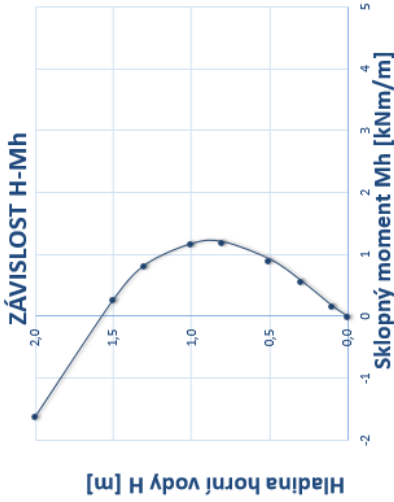
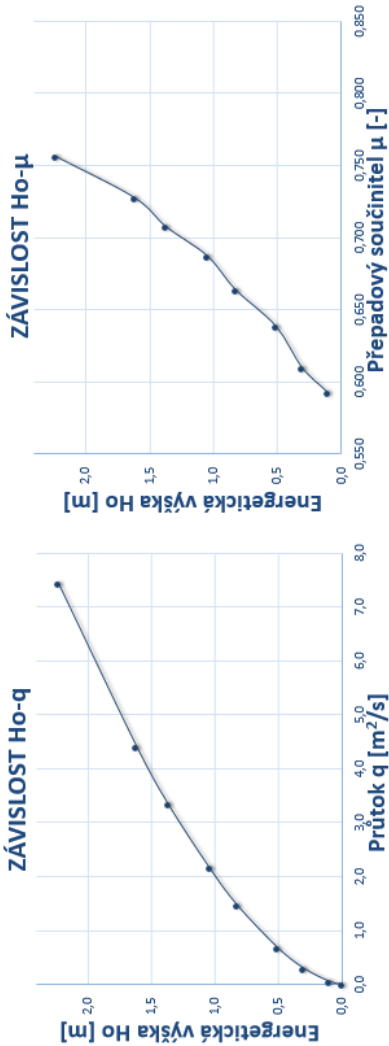
$H = 1\text{ m}$



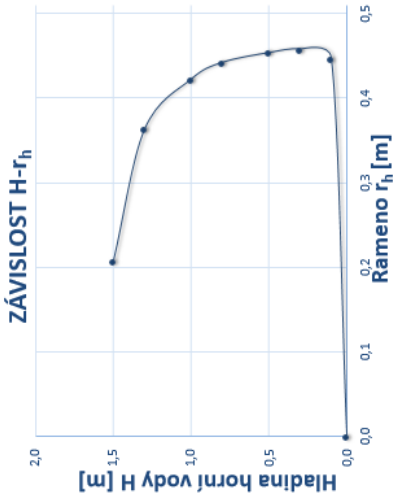
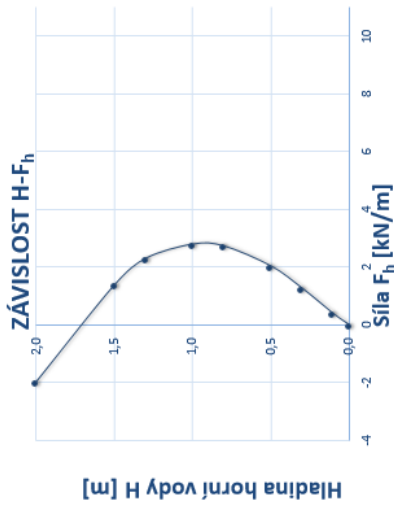
Poloha 13

$\omega = 0^\circ$

$H = 1\text{ m}$



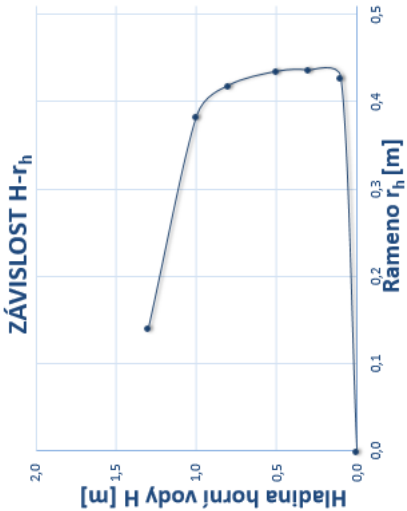
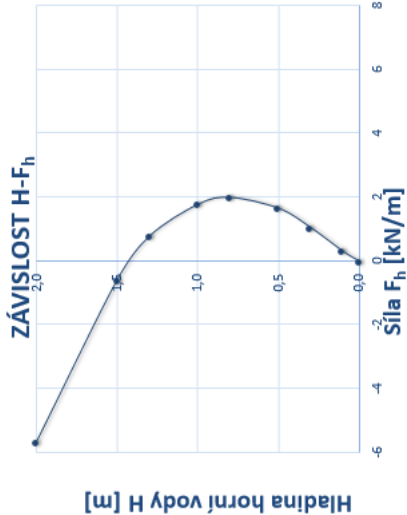
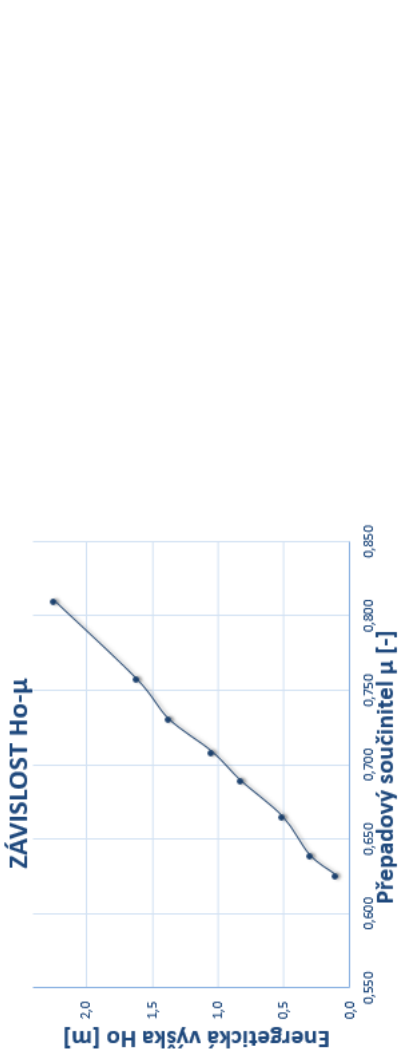
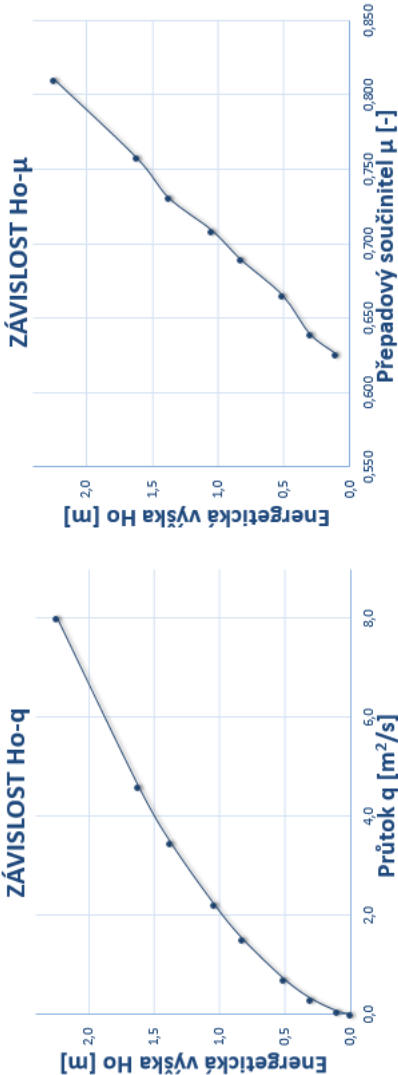
$H = 1\text{ m}$



Poloha 14

$\omega = -5^\circ$

$H = 1\text{ m}$



Příloha S - CD s daty